



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Efectes del canvi climàtic sobre el cabal produït a la xarxa de clavegueres d'una conca urbana

Treball realitzat per:

Jofre Pijoan Cambroner

Dirigit per:

Manuel Gómez Valentín

Grau en:

Enginyeria Civil

Barcelona, Juny 2020

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

Resum

El ràpid creixement que han experimentat les ciutats en les últimes dècades ha significat una transformació del territori i, en especial, de les conques hidrogràfiques naturals. La urbanització crea grans superfícies impermeables, la qual cosa genera que gran part de l'aigua precipitada en un esdeveniment de pluja es transformi en escorrentia, que haurà de ser recollida per la xarxa de clavegueres. Sovint, les xarxes de col·lectors no estan capacitades per assumir tals volums d'escorrentia i, com a conseqüència, es produeixen inundacions i abocaments al medi receptor, amb els efectes mediambientals que això comporta. Cal tenir en compte que el planeta Terra pot estar experimentant un procés de canvi climàtic, i certament, aquests episodis torrencials són cada cop més visibles a les zones del litoral mediterrani.

Aquest treball pretén analitzar de quina manera poden afectar les alteracions pluviomètriques, derivades del procés de canvi climàtic actual, a les actuals xarxes de drenatge urbà. D'aquesta manera es busca establir un punt de partida que permeti ampliar l'estudi i el coneixement sobre aquest camp.

Després d'analitzar extensament les xarxes de clavegueres, l'estudi s'ha centrat en la ciutat de Granollers, aprofundint en les característiques tant morfològiques com climàtiques de la ciutat, així com de la seva xarxa de drenatge. Mitjançant el software de càlcul SWMM v5.1., s'han realitzat simulacions de dos episodis de pluja per tal de poder realitzar una comparativa dels resultats obtinguts, en un episodi de pluja actual per l'any 2020, i un altre episodi en hipotètiques condicions de canvi climàtic per l'any 2050, tots dos amb un període de retorn de 10 anys. Posteriorment, s'han analitzat els resultats i s'han posat sobre la taula les mancances de la xarxa, mostrant també com un augment de les intensitats de pluja les podria fer encara més evidents. També podrien provocar-se greus situacions de perill a nivell qualitatiu de l'aigua, amb abocaments de gran càrrega contaminant a un medi receptor de poc cabal, com és el riu Congost.

Un cop definides les afectacions de la xarxa provocades per l'augment de les intensitats de pluja, a efectes del canvi climàtic, s'ha realitzat un estudi de millora de la xarxa de clavegueres que permeti ajudar i ampliar resultats de cara a futures millores de la xarxa de clavegueres, que tinguin en compte aspectes qualitatius i quantitatius de l'aigua pluvial.

Resumen

El rápido crecimiento que han experimentado las ciudades en las ultimas décadas, ha comportado una transformación global del territorio, y en especial de las cuencas hidrográficas naturales. La urbanización crea grandes superficies impermeables, lo que genera que gran parte del agua precipitada se convierta en escorrentía, que deberá ser recogida por la red de alcantarillado. Habitualmente, las redes de colectores no están suficientemente capacitadas para asumir el gran volumen de escorrentía, y a consecuencia de ello, se producen inundaciones y vertidos en el medio receptor, con los efectos medioambientales que esto conlleva. Hay que tener en cuenta que el planeta Tierra puede estar experimentando un proceso de cambio climático, y que los episodios torrenciales son cada vez mas frecuentes en las zonas del litoral mediterráneo.

Este trabajo pretende analizar de qué manera pueden afectar las alteraciones pluviométricas, derivadas del proceso de cambio climático actual, en las redes de drenaje urbano. De este modo se pretende establecer un punto de partida que permita ampliar el conocimiento sobre este campo de estudio.

Después de analizar con detalle las redes de alcantarillado, se ha centrado el estudio en la ciudad de Granollers, profundizando en las características morfológicas y climáticas de la ciudad, así como su red de saneamiento. Mediante el software de cálculo SWMM v5.1., se han realizado simulaciones de dos episodios de lluvia para poder realizar una comparativa de dichos resultados. Se ha considerado una lluvia de diseño actual para el año 2020, y otro episodio de lluvia en hipotéticas condiciones de cambio climático para el año 2050, ambos con un período de retorno de 10 años. Posteriormente, se han analizado los resultados y se han detectado las deficiencias de la red, así como el efecto negativo que tendría un aumento en las intensidades de lluvia. También podrán generarse situaciones de grave peligro a nivel cualitativo del agua, debido a vertidos con alta carga contaminante a un medio receptor de poco caudal, como lo es el Rio Congost.

Una vez definidas las afectaciones de la red producidas por un aumento de las intensidades de lluvia, a efectos del cambio climático, se ha realizado un estudio de mejora de la red de alcantarillado que permita ayudar y ampliar los resultados para futuras posibles rehabilitaciones de la red, las cuales pretendan mejorarla considerando aspectos cualitativos y cuantitativos del agua.

Abstract

The quick increase that cities have experimented in the last few decades, has meant an important transformation of the landscape and, specially, of the natural drainage basins. The urbanization process creates big impermeable surfaces, which convert an important part of the precipitated water of a rain event into runoff. This amount of water needs to be collected by the sewage system. Usually the network does not have enough capacity to assume those big volumes of runoff and, as a consequence, floods and discharges into natural environment happen, with the environmental consequences that this fact might lead to. Another point to take into account is the likely climate change process that the Planet might be suffering and, certainly, that these episodes of torrential rain are progressively more frequent in the Mediterranean coast area.

This work aims to analyze in which ways the rainfall variations, derived from the current climate change process, may affect the current urban drainage network. From this approach, appears the objective of stablishing a starting point which allows an extension of the study and the knowledge about the subject.

After an extended analysis of the sewage systems, the study has focused in Granollers city, deepening in the morphological and climatic characteristics, as well as in its urban drainage network. With the SWMM v5.1 calculation software, simulations of the two rain episodes have been conducted in order to make a comparison of the results, one from a current rain event and another from a hypothetical event affected by climate change conditions in the year 2050. Both events with 10 years return period. Afterwards, the results have been analyzed and the needs of the system have been displayed, also showing how an increasement of the rain intensity might cause more evident faults. Situations of serious danger at the qualitative level of the water could also be generated, due to discharges with a high pollutant load into a low flow receiving environment, such as the Congost river.

Once the affections of the network, caused by the increasement of rain intensity due to climate change, have been defined, a study for the improvement of the sewage system has been developed, in order to support and extend the results for future improvements of the sewage system, which will take into account qualitative and quantitative aspects of the runoff.

Agraïments

En primer lloc, m'agradaria agrair al meu tutor Manuel Gómez Valentín, la seva dedicació i atenció, fins i tot en els moments complicats de pandèmia del Covid-19. El seu guiatge i consells han estat fonamentals per a la realització d'aquest projecte.

Agrair als meus pares, Jaume i M^a Àngels, el suport i la confiança que han dipositat en mi a l'hora d'afrontar els nous reptes, així com en els bons i mals moments d'aquest procés.

En especial vull esmentar al meu avi Abundio, el qual m'ha inculcat els valors propis de l'enginyeria, i m'ha ensenyat a lluitar per dedicar-me a allò que m'apassiona

Finalment, a la Núria i a totes aquelles persones que m'han acompanyat al llarg d'aquest trajecte i amb les quals he compartit tantes experiències. Gràcies per ajudar-me a arribar fins aquí.

Índex

Resum.....	2
Resumen.....	3
Abstract	4
Agraïments	5
Índex de Figures	8
Índex de Taules	11
1. Introducció	12
1.1. Antecedents i objectius	12
1.2. Estructura del Treball	13
2. Problemàtica de canvi climàtic.....	14
3. Influència de les ciutats en el cicle hidrològic.....	16
4. Xarxes de recollida d'aigües	18
4.1. Història de les xarxes de clavegueram	18
4.2. Funcionament d'una xarxa de col·lectors en zona urbana	20
4.2.1. Mètodes de captació de l'aigua en la superfície.....	23
4.2.2. Transport intermedi	25
4.2.3. Abocament de l'aigua en un medi receptor	27
4.3. Contaminació d'aigües pluvials	28
4.4. Dificultat dels drenatges en zones urbanes	30
4.5. Conseqüències de les inundacions a les urbs.....	33
4.6. Mitigació de les inundacions	36
4.7. Tècniques de drenatge urbà sostenible	39
4.7.1. Mesures no estructurals	39
4.7.2. Mesures estructurals.....	40
4.8. Planejament i normativa del sistema de drenatge pluvial.....	42
5. Cas d'estudi: Granollers	44
5.1. Presentació	44

5.2.	Zona d'estudi	45
5.2.1.	Descripció de la zona d'estudi.....	45
5.2.2.	Característiques de la zona d'estudi	47
5.3.	Descripció de la xarxa de drenatge	53
5.3.1.	Model de la xarxa de drenatge	55
6.	Simulació amb el software SWMM v5.1.	57
6.1.	Presentació del software	57
6.2.	Selecció de pluges de projecte	59
6.2.1.	Episodi de pluja del Cas 1	60
6.2.2.	Episodi de pluja del Cas 2	61
6.3.	Resultats obtinguts de la simulació	62
6.3.1.	Cas 1: Escenari Actual.....	63
6.3.2.	Cas 2: Escenari futur en condicions de canvi climàtic (2050)	68
6.4.	Anàlisi comparatiu dels casos 1 i 2	72
6.4.1.	Pluviometria i escorrentia	72
6.4.2.	Xarxa de col·lectors	74
6.4.3.	Inundabilitat	75
6.4.3.	Qualitat de l'aigua	77
7.	Proposta de millora	85
7.1.	Redimensionament de la GR1	85
8.	Conclusions.....	90
9.	Bibliografia.....	93

Índex de Figures

Figura 1. Multi-model dels principals canvis en (a) precipitació (mm/dia), (b) humitat del sòl (%), (c) escorrentia (mm/dia), (d) evaporació (mm/dia), per el període 2080-2099 en comparació amb 1980-1999. (Font: IPCC).	15
Figura 2. Canvis de la urbanització en el cicle hidrològic. Font: Dr. José Arturo Gleason// IITAAC.	16
Figura 3. Cloaca Màxima a la ciutat de Roma. Pintor: Giovanni Battista Piranesi.....	19
Figura 4. Valors típics del coeficient de permeabilitat k del terreny. Font: FAO Organització de les Nacions Unides.	20
Figura 5. Influència de la urbanització sobre la respuesta hidrològica. Font: Hidrología Urbana, Manuel Gómez Valentín i grup de Recerca FLUMEN.....	21
Figura 6. Representació gràfica de les diferents tipologies d'embornals utilitzats.	24
Figura 7. Representació gràfica d'un pou de registre	26
Figura 8. Sistema de Bombament. Font: FitconSolutions.....	26
Figura 9. Dipòsit del Parc Joan Miró, Barcelona. Font: Ajuntament de Barcelona.....	27
Figura 10. EDAR Granollers. Font: Consorci Besòs-Tordera.	27
Figura 11. Diferents contaminants recollits per l'escorrentia Font: NVCC.....	28
Figura 12. Concentracions mitjanes en l'escorrentia. Font: U.S. Environmental Protection Agency, Programa NURP, Vol. 1. (1983).	30
Figura 13. Inundació en un pou de registre a la ciutat de de Toronto al 2003. Fotografia: Robert Cerjanec.	31
Figura 14. Corba típica d'infiltració sobre un diagrama de pluja.....	32
Figura 15. Casos de flux a través d'embornal. A) descàrrega lliure B) Descàrrega de flux submergit cap al col·lector C) Descarrega des de el col·lector cap a la superfície.	33
Figura 16. L'espluga de Francolí 2019. Font: Diari de Tarragona.	34
Figura 17. Condicions hidràuliques que han generat situacions de perill altes per persones de 50 kg. Comparativa dels criteris de seguretat de Témez (1992, Nanía (1999) i Gómez (2001). (Font: Inundaciones Urbanas: Criterios de peligrosidad y evaluación del riesgo.....	35
Figura 18. Conseqüències de la DANA. Cartagena 2019. Font: Diario ABC.	35
Figura 19. Representació dels criteris de perillositat pels vehicles segons els cabal i velocitats. Font: Inundaciones Urbanas: Criterios de peligrosidad y evaluación del riesgo para peatones y vehículos (Autor: Eduardo Martínez Gomariz).	36
Figura 20. Obres d'ampliació del col·lector. Font: Joan Mateu Parra (El Periódico).	37
Figura 21. Campanya de sensibilització #SeTeHaCaído. Font: ECOEMBES.....	40

Figura 22. Construcció d'un dipòsit soterrat, amb coberta esportiva a Barcelona. Font: CLASBA.	41
Figura 23. Cuneta verda. Font: Innovyze.	42
Figura 24. Ortofoto de la ciutat de Granollers. Font: Institut Cartogràfic de Catalunya.	47
Figura 25. Reconstrucció paisatgística de la zona que ocupa la ciutat de Granollers en diferents èpoques. Font: Els orígens de Granollers i el Vallès Oriental (1984).	48
Figura 26. Plànol de cobertes del sòl de Granollers 2006. Font: Pla de paisatge de Granollers.	49
Figura 27. Representació de la impermeabilitat del terreny a la ciutat de Granollers.	50
Figura 28. Distribució mensual de les Plugues a Granollers. Font: Estudi de la Climatologia de Granollers, Rosa Bruch i Anna Pellicé.	51
Figura 29. Pluviometria històrica de Granollers. Realitzat a partir de dades extretes del Servei Meteorològic de Catalunya.	51
Figura 30. Escenaris climàtics regionalitzats a l'Àrea Metropolitana de Barcelona. Font: Projecte ESAMB.	53
Figura 31. Disposició d'embornals i reixes a la Ciutat de Granollers. Font: Drenatges Urbans del Besos, S.L.	54
Figura 32. Estat de la xarxa de clavegueram. Font: Drenatges Urbans del Besos, S.L.	55
Figura 33. Model de la xarxa de drenatge urbà de Granollers utilitzada amb el software SWMM5.	59
Figura 34. Hietograma d'intensitats de pluja de disseny, Plubarna 2010 IIA.	60
Figura 35. Hietograma d'intensitats de pluja de Plubarna 2050 A1B.	61
Figura 36. Sèrie temporal introduïda al software SWMM5 del Cas 1.	63
Figura 37. Representació de la càrrega als col·lectors al minut 0:35 del procés de pluja.	65
Figura 38. Representació de la inundació als nodes al minut 0:30 del procés de pluja.	66
Figura 39. Carrer Lluís Companys de Granollers, inundat per la tempesta divendres 07/09/2018 (Font: NacióDigital. Foto: @elisendacat).	68
Figura 40. Sèrie temporal introduïda al software SWMM del Cas 2.	68
Figura 41. Representació de la càrrega als col·lectors al minut 0:35 del procés de pluja.	70
Figura 42. Representació de la inundació als nodes al minut 0:30 del procés de pluja.	71
Figura 43. Gràfic comparatiu dels hietogrames de precipitació en ambdós casos de simulació.	72
Figura 44. Polutograma de SS dels Outfalls en els dos Casos d'estudi.	80
Figura 45. Polutograma de DQO dels Outfalls en els dos Casos d'estudi.	80
Figura 46. Polutograma de NH4 dels Outfalls en els dos casos d'estudi.	81
Figura 47. Cabal d'aigua als Outfalls pels dos casos d'estudi.	82
Figura 48. Cabal màssic de SS dels Outfalls en els dos casos d'estudi.	83

Figura 49. Cabal màssic de DQO dels Outfalls en els dos casos d'estudi.	83
Figura 50. Cabal màssic de NH ₄ als Outfalls en els dos casos d'estudi.	83
Figura 51. Perfil longitudinal de la línia GR1, entre els col·lectors GR_1 i GR_31, en l' instant de pluja 0:50h.	86
Figura 52. Perfil longitudinal de la línia GR1, entre els col·lectors GR_31 i GR_66, en l' instant de pluja 0:50h.	87
Figura 53. Perfil longitudinal de la línia GR1 redimensionada, entre els col·lectors GR_2 i GR_31, en l' instant de pluja 0:50h.	88
Figura 54. Perfil longitudinal de la línia GR1 redimensionada, entre els col·lectors GR_31 i GR_66, en l' instant de pluja 0:50h.	88

Índex de Taules

Taula 1. Comparatiu entre els sistemes convencionals i els SUDS. (Font: DAYWATER. Report 5.1. Review of the Use of Stormwater BMPs in Europe, (2003)).....	39
Taula 2. Valors obtinguts del procés de transformació pluja-esorrentia en ambdós casos de simulació.	73
Taula 3. Augment dels volums obtinguts del cas 2 respecte al cas 1 del procés de transformació pluja-esorrentia.	73
Taula 4. Resum dels resultats obtinguts en la xarxa de col·lectors i comparativa.	74
Taula 5. Resultats d'inundació dels 25 nodes amb més volum inundat, en els dos casos de simulació.	76
Taula 6. Resultats totals de la inundació als pous de registre.	77
Taula 7. Valors de la qualitat del l'aigua obtinguts en la primera simulació (kg).	78
Taula 8. Valors de la qualitat del l'aigua obtinguts en la segona simulació (kg).	79
Taula 9. Resultats quantitatius d'abocaments de contaminants i comparatiu dels dos casos de simulació.	84
Taula 10. Comparatiu resultats quantitatius d'aigua realitzant el redimensionament de la GR1.	89

1. Introducció

1.1. Antecedents i objectius

Històricament la planificació i el control de les xarxes de drenatge, així com l'estudi dels processos de pluges i la conseqüent generació de l'escorrentia, han tingut un pes ínfim en la societat científica, tot i la importància real que requeriria aquest camp d'estudi. El desconeixement, la falta de dades o comprovacions, i la manca de models adients per tal de poder simular el funcionament precís de la xarxa, tant a nivell subterrani com a nivell superficial, han estat factors que han minvat les opcions d'estudiar amb més profunditat les xarxes de clavegueres de les ciutats. Un altre factor important està relacionat amb la naturalesa humana, i és que els humans tendim a donar importància a les coses palpables i visuals, restant rellevància a aquells elements que no es presenten en la nostra quotidianitat, com és el cas dels drenatges pluvials que solen ser més aviat invisibles al estar soterrats. El fet d'estar ubicats a sota de les nostres ciutats, dificulta molt la modificació d'aquests elements i també n'incrementa els costos de manera exponencial. Hem de tenir en compte que, així com la majoria d'elements públics, aquests es van construir en diferents fases o, fins i tot, en diferents èpoques, i conseqüentment existeixen moltes tipologies constructives, tant pel que fa al triatge de materials, com a la planificació i disseny de les xarxes, resultant sovint mancats d'una lògica coherent.

Actualment existeix cada cop més una visió avançada de les xarxes de sanejament, possiblement deguda als canvis de normativa que obliguen a generar Plans Directors de Sanejament i de Drenatge. Aquests requereixen un coneixement exhaustiu de la xarxa i, mitjançant els nous models de simulació i de registre de dades, ajuden a millorar la interpretació de dites xarxes.

Cada vegada la normativa és més estricta degut, en gran mesura, a les freqüents variants climatològiques que s'estan produint en últims anys i que, segons les previsions actuals, es continuaran produint si es confirma el procés de canvi climàtic. Aquestes noves condicions climàtiques causen pluges de forta intensitat o torrencials i creen situacions de desbordaments de les xarxes. Els desbordaments i inundacions de les ciutats poden provocar greus situacions de risc per raó de les velocitats i calats de l'aigua en superfície. Cal destacar, amb la mateixa importància, que l'escorrentia superficial genera contaminació en l'entorn natural. Per totes aquestes raons, l'estudi de les xarxes de clavegueres té vital importància a l'hora d'intentar mitigar i alleujar les càrregues contaminants al medi, així com d'evitar possibles situacions de perill per a les persones.

Així doncs, aquest treball té com a objectiu estudiar en profunditat les xarxes de drenatge, concretament es basarà en l'estudi de la ciutat de Granollers. Es buscarà simular el funcionament de la xarxa en condicions actuals, així com en hipotètiques condicions de canvi climàtic, per tal de poder fer un anàlisi comparatiu determinant així les possibles mancances de la xarxa.

També pretén establir un punt inicial per a determinar possibles mesures de mitigació i solucions als diferents problemes o punts conflictius que es puguin fer visibles a través de l'estudi.

1.2. Estructura del Treball

Abans de començar a realitzar l'estudi comparatiu dels dos escenaris de simulació, és necessari entendre i estudiar tots els aspectes i factors que comprenen les xarxes de drenatge urbà, així com les prediccions mediambientals.

En primer lloc, s'estudiarà quin rol juga el canvi climàtic en les xarxes de drenatge urbà i com influeix la creació de la ciutat i la contaminació al cicle hidrològic. Un cop plantejada la problemàtica, es passaran a descriure les xarxes de clavegueres de les ciutats. D'aquesta manera s'estudiarà la història, el funcionament i la contaminació de les aigües, i les dificultats constructives actuals.

A continuació s'aprofundirà en el cas d'estudi, concretament a la ciutat de Granollers, on es veuran les característiques de la zona i la seva xarxa de drenatge existent.

Posteriorment, es realitzarà l'estudi comparatiu mitjançant dues simulacions amb el software de càlcul SWMM v.5.1., amb el qual es pretén determinar quin pot ser l'impacte i les afectacions dels canvis meteorològics que pot produir el canvi climàtic en la xarxa de drenatge de la ciutat, tan a nivell quantitatiu com qualitatiu de les aigües pluvials.

Finalment, s'intentarà donar una possible resposta a les dificultats que experimenta la xarxa, per tal de poder marcar les pautes per una futura línia d'estudi que tingui la voluntat de redimensionar la xarxa actual.

2. Problemàtica de canvi climàtic

Si partim de la premissa que el canvi climàtic és la variació de tots aquells elements que conformen el clima del planeta terra, podem afirmar que aquest es troba en un procés de canvi climàtic i que, principalment, aquest es deu a l'acció humana. Tot i així, es tracta encara d'una afirmació que continua generant certa controvèrsia tant en la comunitat científica com en altres espais d'opinió. Podem considerar que aquest debat es produeix per la condició d'esdeveniment futur que se li atorga i que en dificulta la seva predicció exacta, tant a curt com a llarg termini.

Al llarg de les diferents etapes geològiques en què es divideix la història del planeta terra fins l'actualitat, s'han anat succeint un seguit de processos de canvi climàtic. Aquests, tant han pogut ser generats per elements externs com per elements propis del planeta, ja que pateix canvis cíclics *per se*. Trobem així, períodes glacials i períodes d'augment de temperatures, entre d'altres. Generalment aquests lents i progressius canvis han acabat amb gran part dels ecosistemes i les formes de vida de les respectives èpoques.

En el cas del canvi climàtic actual, trobem una tendència de canvi molt més accelerada que en èpoques anteriors. L'impacte humà, esdevé un element condicionant d'aquesta acceleració, en gran part provocada per la crema indiscriminada de combustibles fòssils que contribueix a un escalfament de l'atmosfera terrestre, per l'acumulació de gasos d'efecte hivernacle, així com la progressiva destrucció de la capa d'Ozó. És per això que l'espècie humana en l'actualitat es troba en un atzucac, per la mala gestió de les possibles alternatives relatives al consum i ritme de vida humà, i per la poca consciència col·lectiva de les possibles conseqüències de mantenir aquest *status quo*.

El canvi climàtic és, doncs, cada dia més evident i es fa més latent en les nostres vides. El IPCC al 2007, *Intergovernmental Panel on Climate Change*, determina que degut als efectes del canvi climàtic, durant el segle XXI, es produiran alteracions en els cicles hidrològics. En aquest cas, el clima pot passar a patir processos extrems, com per exemple, llargues sequeres, pluges torrencials, huracans o DANES (depressió aïllada a nivells alts) més conegudes com a gota freda.

***“És molt probable que els episodis de precipitació extrema
siguin més intensos i freqüents en moltes zones del Planeta”
(IPCC, 2014)***

Tots aquests processos, no habituals en les últimes dècades, cada cop són més freqüents pel que respecta al clima mediterrani, que de per si mateix ja tendeix a patir processos extrems.

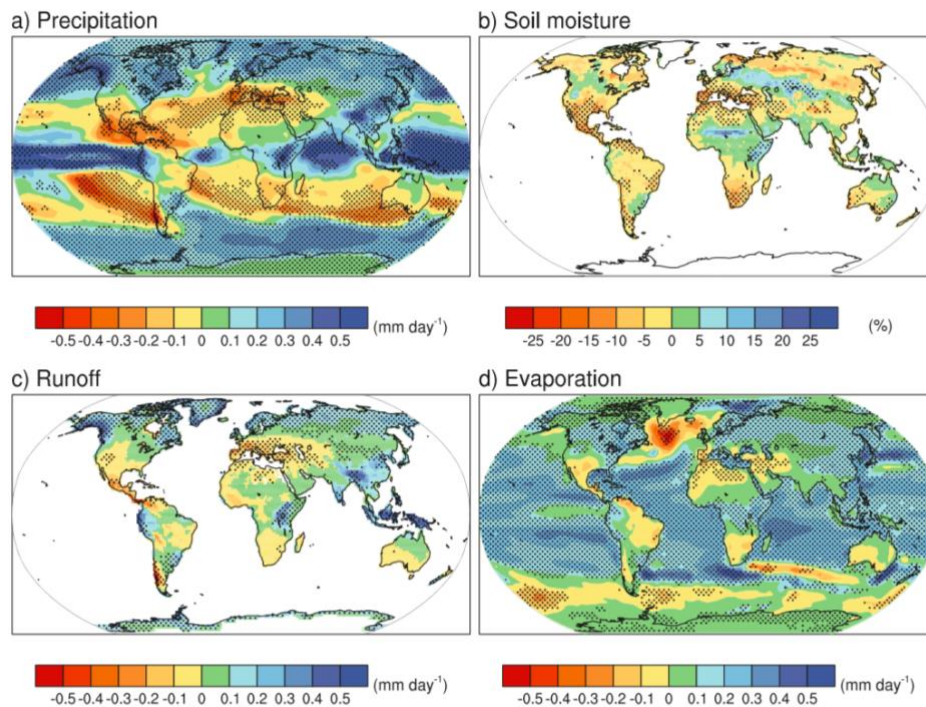


Figura 1. Multi-model dels principals canvis en (a) precipitació (mm/dia), (b) humitat del sòl (%), (c) escorrentia (mm/dia), (d) evaporació (mm/dia), per el període 2080-2099 en comparació amb 1980-1999. (Font: IPCC).

En termes hidrològics, per tant, hem de tenir en compte principalment dos factors. Per una banda l'augment de la temperatura, degut a l'escalfament global, més notori en grans ciutats, pot provocar que la capacitat de l'atmosfera per retenir l'aigua augmenti, causant així un increment en les intensitats de pluja. Per altra banda els canvis pluviomètrics, que comentarem posteriorment.

D'altra banda, les alteracions de temperatura poden fer que els paràmetres de disseny actuals, de les xarxes de drenatge referents a l'evaporació i la humitat, canviïn. Cal tenir en compte, doncs, que les xarxes de drenatge actuals poden no estar adequadament adaptades per a les noves circumstàncies i els nous processos de pluges torrencials.

És per això que cal destacar la importància de considerar els efectes del canvi climàtic per realitzar una aproximació, el més acurada possible, en l'estudi i el redimensionament de les xarxes de drenatge urbà. Alguns autors com (Grum et al, 2006), determinen que s'han de considerar el major nombre de casuístiques possibles pel que fa als valors pluviomètrics i factors meteorològics, i a partir d'aquests adaptar les normes de disseny de les xarxes de clavegueram. D'aquesta manera es podran evitar possibles problemàtiques a nivell d'inundacions urbanes, així com desgràcies a nivell humà.

3. Influència de les ciutats en el cicle hidrològic

El drenatge d'aigües pluvials a les zones urbanes ha esdevingut un vertader problema, en les últimes dècades, produït en gran mesura per la massificació d'urbs i el creixement descontrolat d'aquestes ciutats. Aquesta situació s'explica, en gran part, a causa de l'èxode del camp cap a les ciutats que, en el cas de l'Estat Espanyol, va destacar sobretot entre les dècades dels anys 50 i 80, durant les quals es va arribar a produir un augment de la demografia, que en algunes ciutats va suposar un increment de més del 100%. En algunes poblacions de les àrees metropolitanes de grans ciutats com Barcelona, es va experimentar un augment del 800% entre els anys 1950 i 1990, com és el cas de la ciutat de Cornellà de Llobregat.

Aquest fet, va comportar la urbanització de moltes zones noves de les ciutats de manera molt ràpida i, sovint, sense tenir en compte les conseqüències que comportaria aquesta situació. Tampoc es va considerar la gran quantitat de terreny no permeable que s'estava agrupant. Tots aquests factors sumats al, sovint inexistent, o mal plantejament de les xarxes de recollida d'aigües, comporten una l'alteració de la hidrologia natural de les conques hidrològiques.

Per tendència general, els assentaments humans han estat construïts al costat de rius o rieres. Les ciutats, amb el progressiu creixement de les poblacions i, per tant, del terreny urbà, han acabat ocupant extenses quantitats d'aquests terrenys. Com a conseqüència d'aquest creixement, s'han modificat, en alguns casos, els traçats de les lleres d'aquests rius o rieres, cosa que afecta notòriament a les capacitats de transport d'aigües i el desguàs d'aquests, de tal manera que la possibilitat d'episodis de desbordaments i inundacions augmenta.

Bàsicament, la creació de ciutats en el medi natural, altera àmpliament el cicle hidrològic natural, generant diferències significatives respecte la seva estructura inicial, tal i com es pot apreciar en la figura següent:

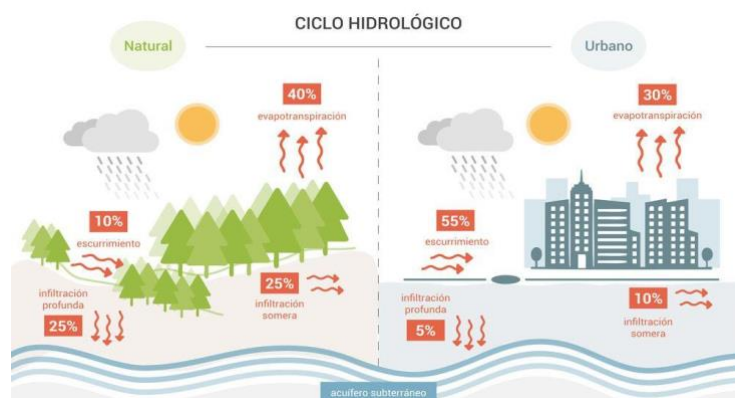


Figura 2. Canvis de la urbanització en el cicle hidrològic. Font: Dr. José Arturo Gleason// IITAAC.

Si ens fixem en el cicle hidrològic natural, podem determinar les diferents fases o processos.

Principalment són:

- Evapotranspiració: Procés en el qual l'aigua s'evapora des d'oceans, superfície terrestre i a través d'organismes vius.
- Condensació: L'aigua en forma vaporosa, ascendeix a través de les capes atmosfèriques fins que s'acaba condensant en petites gotes d'aigua, creant d'aquesta manera els núvols.
- Precipitació: Les gotes que constitueixen els núvols, quan es refreden, acceleren el procés de condensació i aquestes diminutes gotes d'aigua, s'acaben agrupant en gotes de major grandària que quan arriben a un pes suficient, acaben precipitant a la superfície.
- Infiltració: Quan l'aigua de la pluja ha precipitat sobre la superfície, aquesta penetra a través dels porus i viatja subterràniament. Depenent de la permeabilitat del terreny, la pendent i la cobertura vegetal, aquesta infiltració serà més o menys efectiva.

A les ciutats s'hi pot observar un comportament diferent, tant a nivell de contaminació com del recorregut de l'aigua en el cicle esmentat. L'aigua de la pluja, en el procés de precipitació en les ciutats, travessa capes de contaminació on hi ha partícules contaminants. Aquestes partícules contaminants s'impregnen en l'aigua en forma de pluja, que cau sobre el paviment, també contaminat. Degut a l'existència del paviment, l'aigua no pot infiltrar-se i comença el procés d'escorrentia. Aquesta aigua contaminada, també arrossega els contaminants existents a la superfície de la ciutat i és recollida per la xarxa de recollida d'aigües pluvials i conduïda a les depuradores per intentar eliminar o neutralitzar al màxim els contaminants presents segons el seu cabal de disseny. Després de ser processada, és reintroduïda en rius o al mar, per posteriorment tornar a ser evaporada però una part no pot ser tractada i arriba als rius de manera directa.

Així doncs podem afirmar, que a causa de l'aparició de grans masses urbanes, es produeix una modificació del procés de transformació pluja-escorrentia. Les ciutats tendeixen a intentar expulsar l'aigua el més ràpid possible, afavorint així l'augment de les velocitats de circulació de les aigües. Això genera, en molts casos, una concentració molt gran d'aigües en les parts inferiors de les conques, i/o de les xarxes de sanejament, aportant més cabal del que estan capacitades a transportar. Com a conseqüència d'aquesta situació, en molts casos, acaba generant problemes d'inundacions.

4. Xarxes de recollida d'aigües

4.1. Història de les xarxes de clavegueram

La creació d'infraestructures per dur a terme l'evacuació d'aigua pluvial o residual, s'origina a les primeres agrupacions humanes en pobles i ciutats. Aquest fet, sorgeix principalment de la necessitat d'evacuar l'aigua estancada ja que comportava molts conflictes humans i socials, a part de causar problemes de salubritat i afavorir el contagi d'infeccions o malalties.

Algunes de les primeres referències pel que fa als sistemes de clavegueram, es troben en civilitzacions antigues, com el cas de la Vall d'Indo (Índia). En diverses ciutats de la zona, com per exemple les ciutats de Rakhigarhi o Lothal, s'hi han trobat jaciments que daten aproximadament del 3500aC, on ja disposaven de sistema de clavegueram. Aquestes ciutats es construïen a la vora de rius, i hi van construir una seguit de canalitzacions per fer efectiva l'evacuació de les aigües pluvials, evitant així possibles inundacions. També es troben algunes de les primeres construccions de clavegueram per l'evacuació d'aigües residuals. Aquestes ja disposaven de canonades situades a sota dels carrers, a una profunditat aproximada d'un metre sota el nivell del sòl, de forma rectangular i construïdes amb totxanes.

Posteriorment, també construïen altres canonades més petites de diàmetre i de forma cilíndrica, provinents del desaigua de les llars, i que conduïen les aigües residuals fins a les grans canonades. Els sistemes disposaven de reixes o petits embornals, per conduir l'aigua de la pluja cap a la canonada principal. Fins i tot, s'han trobat dipòsits d'emmagatzematge d'aigües pluvials, la qual cosa mostra un nivell avançat d'enginyeria en el seu temps.

En termes enginyerils, al món Occidental, es tendeix a focalitzar-se molt en l'època romana, ja que va ser una època on es va aprofundir en la idea d'una millora de la societat a partir de la creació de nous elements i infraestructures.

Els romans, van crear al segle VII aC. el seu primer sistema de recollida d'aigües, mitjançant canals a cel obert, a la ciutat de Roma. Lentament van anar evolucionant, fins que entre els segles II i I aC. es va construir l'anomenada *Cloaca Màxima*. Aquesta era un sistema de clavegueram combinat, que desembocava en un complex sistema de col·lectors més grans, i que transportava tant les aigües negres com l'escorrentia urbana fins al riu Tíber. Aquesta és doncs, una de les primeres grans obres de l'enginyeria hidràulica.



Figura 3. Cloaca Màxima a la ciutat de Roma. Pintor: Giovanni Battista Piranesi

En els successius segles podem trobar exemples de sistemes de clavegueram, en ciutats com Roma, París o Londres, bàsicament dedicats a la recollida d'aigües pluvials, però no és fins el període comprès entre el s. XIX fins l'actualitat, que no hi ha hagut un creixement en innovació i generalització d'aquests sistemes de recollida d'aigües a nivell global, arribant així a gran part de la població mundial.

El primer sistema de clavegueram modern es va dissenyar, a la ciutat d'Hamburg (Alemanya) el 1842. Per a la construcció es van utilitzar fonaments hidràulics, es van considerar condicions topogràfiques i es van tenir en compte les necessitats i previsions de creixement de la ciutat així com la seva demografia.

Al llarg del segle XIX la construcció de xarxes de sanejament va patir un gran auge, degut principalment a la conclusió que moltes malalties endèmiques eren ocasionades pel mal drenatge de les aigües residuals. Fins i tot, va sorgir l'anomenat pensament Higienista, un moviment arquitectònic i urbanista que cercava l'eliminació de la insalubritat dels habitatges en les ciutats i que també dona lloc l'origen de la xarxa de drenatge de Barcelona. Aquest moviment va tenir també molta importància en ciutats com París, on es van prendre mesures per evitar la propagació de malalties, i en especial de la tuberculosi. Tot i això, en aquella època tenien carències pel què fa a mitjans de càlcul a l'hora de fer efectius l'anàlisi i els criteris de disseny i predimensionament de les xarxes, així com procediments i elements constructius. Per aquest motiu la majoria de xarxes van ser construïdes seguint criteris intuïtius i el parer d'enginyers de l'època en qüestió, i tot i que gran part dels criteris dels enginyers van ser molt àmpliament encertats, va comportar una sèrie de problemàtiques.

Moltes de les xarxes de sanejament construïdes al llarg dels segles XVIII i XIX, tenien problemes de disseny, tant en tema de capacitats, com a nivell estructural, o pel que fa a les pendent. El problema principal d'aquestes xarxes, era que per poder readequar-les o realitzar-hi petites modificacions que les farien funcionals, suposava una gran despesa, ja que estaven soterrades i per tant de molt difícil accés. Això va comportar que durant el segle XX, s'evidenciessin problemes derivats de la no adequació de les instal·lacions, patint a moltes ciutats inundacions o problemes d'evacuació d'aigües. Aquest fet va contribuir de forma directa a l'estudi de la hidràulica, no només en termes teòrics sinó que també la seva aplicació a les ciutats, el que va donar lloc a la disciplina que avui es coneix com a hidrologia urbana.

4.2. Funcionament d'una xarxa de col·lectors en zona urbana

La majoria de zones urbanes es solen construir a les conques naturals, i com s'ha esmentat anteriorment, això comporta una sèrie d'alteracions en el cicle hidrològic natural d'aquestes conques.

La urbanització suposa una impermeabilització del terreny, alterant així el cicle de drenatge natural. Aquest en estat natural pot variar àmpliament, segons la tipologia de terreny, des de permeabilitats molt altes en zones al·luvials, fins a argiles molt fines les quals impossibiliten quasi la infiltració. El procés d'urbanització sempre disminueix el coeficient de permeabilitat, i per contra augmenta el coeficient d'escorrentia.

A continuació es mostra una taula dels diferents valors del coeficient de permeabilitat del terreny (k), segons les tipologies de sòl:



Figura 4. Valors típics del coeficient de permeabilitat k del terreny. Font: FAO Organització de les Nacions Unides.

En els terrenys vegetal, el grau d'impermeabilitat varia entre un 10-20%, i en ciutats, per contra el situem entre un 75-90%. Aquesta diferència tant significativa dels valors es pot relacionar, principalment, a la idea d'intentar eliminar l'aigua de la superfície el més aviat possible. Per tal de fer efectiva una evacuació el més ràpid possible de les aigües, es sol crear una pavimentació de les superfícies, a més a més de les comoditats i facilitats que això suposa per desenvolupar la vida humana. Aquest fet però, redueix també el coeficient de rugositat, ocasionant en molts casos que s'incrementi encara més les velocitats del flux d'aigua.

La situació de tenir un flux d'aigua circulant per els carrers, en cas de precipitació, afecta directament al ciutadà, i inclús els hi pot provocar situacions de risc personal. Aquestes afectacions són en gran part provocades per possibles bassals, creats per irregularitats del terreny, o esfondraments del paviment, causant dificultats de mobilitat urbana tant en vianants com al trànsit rodat de vehicles.

En ocasions si es donen les circumstàncies de poca impermeabilitat, i una forta pendent, pot acabar ocasionant altes velocitats del flux d'escorrentia, de fins a 4m/s. Tenint en compte que l'aigua té la capacitat d'arrossegar objectes, depenent del calat que adquireixi el flux d'aigua, pot donar-se la circumstància de bolcament o arrossegament del ciutadans, de mobiliari urbà, o fins i tot d'algun vehicle motor.

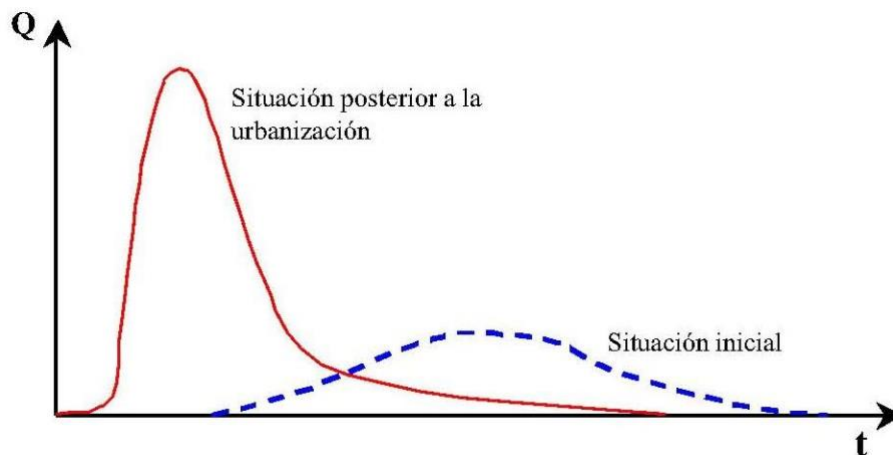


Figura 5. Influència de la urbanització sobre la resposta hidrològica. Font: Hidrología Urbana, Manuel Gómez Valentín i grup de Recerca FLUMEN.

L'aigua que no pot infiltrar-se en el medi natural, és recollida per una xarxa de col·lectors. La agrupació de l'aigua en col·lectors encara augmenta més la velocitat en aigües avall. Això comporta una modificació dels hidrogrames, que són els gràfics relatius a les variacions dels

cabals respecte al temps. Per tant en aigües avall de la ciutat, s'incrementarà tant el caudal màxim com els volums d'escorrentia.

D'altra banda a les zones urbanes també es disminueix el temps de concentració, que és el temps entre el inici de l'escorrentia i el moment en que es produeix l'escorrentia màxima.

Tots aquests factors propicien unes condicions que afavoreixen el desenvolupament d'inundacions a les zones d'aigües avall, sobretot a les ciutats, en les quals, les zones d'aigües avall tenen pendents nul·les o molt petites. En elles arriba una gran quantitat d'escorrentia des de les zones d'aigües a dalt, a una gran velocitat, i pot quedar-se estancada amb facilitat en les zones aigües avall, amb la problemàtica afegida de la impossibilitat d'expulsar-la mitjançant les pendents.

Principalment existeixen dos tipus de modalitats de xarxes de clavegueres, que poden ser unitàries o bé separatives.

D'una banda la xarxa de drenatge unitària, és aquella per la qual hi circulen aigües negres i aigües de pluja alhora per un mateix conducte. Per altre banda en la xarxa separativa, existeixen dos sistemes de canalització, un per les aigües de pluja i l'altre per les negres.

A nivell de costos, la xarxa separativa suposa una gran inversió a l'hora de construir la infraestructura, ja que es necessita la construcció d'una xarxa de canalització doble, i per tant, suposa aproximadament la duplicació del pressupost necessari respecte a la xarxa unitària.

La xarxa separativa, es va fer popular durant l'inici i mitjans del segle XX, va permetre la separació de les aigües, contribuint a poder reutilitzar les aigües de pluja sense necessitat de tractament. En els darrers anys, però s'han trobat una sèrie d'inconvenients pel que respecta a les xarxes separatives. A banda del alt cost, i el manteniment, existeixen altres problemàtiques. S'ha comprovat que les aigües pluvials urbanes estan altament contaminades, motiu pel qual la seva reutilització queda restringida. També condiciona la neteja de la xarxa de residuals, ja que aquesta no es neteja en cada esdeveniment de pluja, i pot arribar a fer necessària l'ús d'aigües netes en cabals importants per fer una neteja de la xarxa, amb la corresponent pol·lució d'aquestes i la despesa d'aigua potable. Per aquest motiu en l'inici del segle XXI s'estan reduint l'ús de les xarxes separatives, tant en rehabilitació com en xarxes de nova construcció.

Posant èmfasi al funcionament de les xarxes de drenatge urbà, podem separar la totalitat del procés en diferents fases. Per dir, doncs, que una xarxa funciona correctament s'han de superar amb èxit totes les fases. Les podem classificar en tres grans grups:

- A. Captació de l'aigua en la superfície: primera fase en la qual l'aigua contacta amb la superfície i es conduïda i recollida pels elements de captació.
- B. Transport intermedi: fase en la qual l'aigua es transportada per la infraestructura subterrània de la ciutat fins al seu destí.
- C. Abocament de l'aigua a un medi receptor: última fase del procés en la qual l'aigua deixa de circular per els conductes i és abocada al medi natural. Habitualment és abocada després de passar per tractaments de depuració, tot i que en altres casos s'alliberen les aigües sense cap procés de depuració.

Les tres fases que conformen el procés de recollida d'aigües pluvials són, per tant, importants a l'hora de fer efectiva una correcta recollida i gestió d'aquestes aigües.

Les raons bàsiques perquè aquesta xarxa sigui efectiva i eficient, venen condicionades si s'ha realitzat un bon disseny de la xarxa de col·lectors, si s'han aproximat adequadament els cabals de projecte i si s'han utilitzat uns coeficients de seguretat adients.

En el següents punts s'analitzaran en profunditat quins elements podem trobar en cadascuna de les tres fases, i quins són els més adients segons respectives les condicions de contorn.

4.2.1. Mètodes de captació de l'aigua en la superfície

A les ciutats i pobles d'arreu la captació d'aigua superficial es realitza mitjançant embornals. Aquests són elements que pretenen captar l'aigua pluvial que corre per la superfície de l'espai públic en carrers i voreres. Al llarg de la història s'han utilitzat diferents tipologies d'embornals, però tradicionalment han estat creades més aviat pensant més en un àmbit visual i estètic que no pas amb caire d'eficiència a l'hora de recaptar les aigües. Trobem però diferents estudis que intenten relacionar l'eficiència de captació (E) tant amb el cabal circulat per el carrer (Q) com el calat de la làmina d'aigua (y), expressada en la següent fórmula proposta per (Gómez et al. 2000):

$$E = A \cdot (Q/y)^B$$

on A i B són coeficients relatius a l'embornal i a la pendent d'aquesta.

A la següent figura, podem veure representats els diferents tipus d'embornals, segons la forma geomètrica, pendent i elements utilitzats:

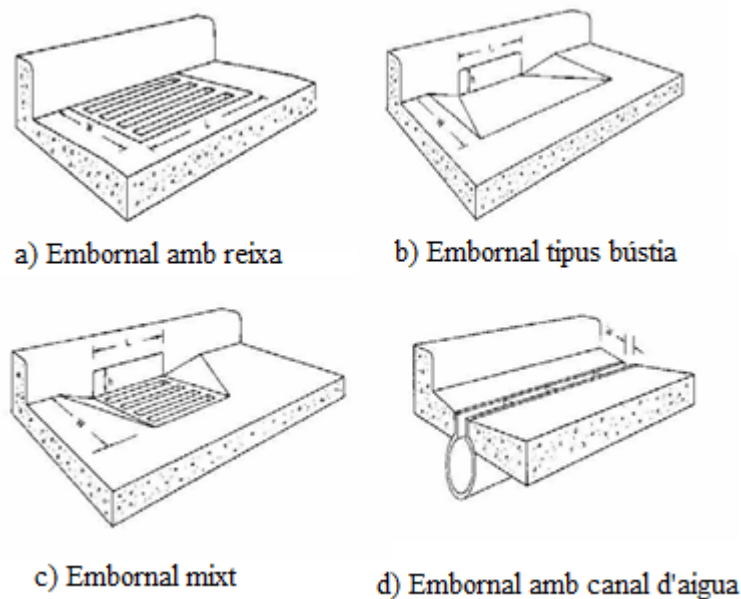


Figura 6. Representació gràfica de les diferents tipologies d'embornals utilitzats.

a) Embornal amb reixa:

És comunament utilitzat en pobles i ciutats d'arreu, ja que a nivell d'eficiència hidràulica compleix de forma acceptable en condicions de pendents mitjanes i baixes. Aquesta tipologia d'embornal necessita una neteja periòdica degut a que fàcilment es pot obstruir, i col·locat a la calçada pot significar un perill per determinats vehicles com ara bicicletes o patinets, segons la dimensió i direcció de la obertura de la reixa. Es situen a distàncies de 20 a 70 metres, al llarg de carrers de manera que cobreixin una superfície de 300 a 800 m², recollint així una mitjana d'uns 5-10 l/s.

b) Embornal tipus bústia:

L'embornal tipus bústia és eficient en zones amb pendents molt baixes, és per això que no es recomana per a pendents superiors al 31%. Posseeix pendent pròpia la qual cosa ajuda a conduir el flux d'aigua cap a la obertura.

c) Embornal mixt:

És una combinació de les tipologies d'embornal en reixa i bústia. Sovint els trobem també situats en sèrie per afavorir d'aquesta manera, les avantatges d'un i del altre, ja que amb aquesta combinació, s'assegura que l'embornal bústia elimina la brutícia i d'aquesta manera el embornal tipo reixa pot recaptar l'aigua de forma més eficient, sense dificultats a poder ser obstruït.

d) Embornal amb canal d'aigua

L'embornal amb canal d'aigua és simplement una canalització subterrània amb una obertura transversal que connecta amb la superfície. És poc eficaç en casos on sigui propensa la brutícia, ja que es altament sensible a experimentar processos de colmatació. Tot i això, és útil en calçades amb seccions amples.

4.2.2. Transport intermedi

Un cop l'aigua es recollida pels medis de captació, aquesta necessita ser conduïda mitjançant una sèrie de col·lectors o conductes, que juntament amb altres elements complementaris conformen el nivell intermedi de les xarxes de sanejament.

Podem classificar els diferents tipus de col·lectors, segons el seu ús o diàmetre, en primaris o secundaris:

- Col·lectors secundaris: són conductes que recullen les aigües provinents de la superfície i els baixants dels edificis (sovint també anomenats col·lectors terciaris) i la transporten als grans col·lectors, anomenats primaris, seguint el curs de carrers i vies públiques, de forma soterrada.
- Col·lectors primaris: Són col·lectors amb major diàmetre i capacitat. Estan situats, principalment, a les parts baixes de la ciutat, ja que en aquests punts s'ha d'encabir una major quantitat d'aigua. Conduïxen l'aigua fins al seu destí final.

A part de la xarxa de col·lectors, una xarxa de sanejament disposa d'altres elements complementaris, però necessaris en alguns casos per al correcte funcionament i supervisió de la xarxa.

- Pous de registre: són elements que s'instal·len per poder permetre el pas a la inspecció, neteja o presa de dades de la xarxa. Són de col·locació obligatòria en diferents situacions, com ara en canvis de direcció de les conduccions, en confluències de 2 o més col·lectors, al principi de col·lectors, en canvi de secció del col·lector, i també en trams rectes a una distància mai superior a 50 metres en sòl urbà.



Figura 7. Representació gràfica d'un pou de registre

- Estacions de bombament: en ocasions es precisa d'algun element extern per poder efectuar el moviment d'aigües per la xarxa de clavegueres. Aquestes funcionen per gravetat, i es pot donar la circumstància que les pendents dels conductes no siguin suficients per al transport de l'aigua, degut a una ciutat amb una topografia molt plana. Aleshores són necessàries les estacions de bombament, que permeten conduir l'aigua fins a cotes més elevades, superant així desnivells contraris, i d'aquesta manera evitant un sobrecost en la construcció de la xarxa.



Figura 8. Sistema de Bombament. Font: FitconSolutions.

- Dipòsits de retenció: són estructures que permeten l'emmagatzematge d'aigües. D'aquesta manera es produeix una laminació de l'aigua, en esdeveniments de pluges torrencials, que generen un gran cabal en la xarxa de col·lectors, evitant així possibles inundacions. Posteriorment, descarreguen l'aigua acumulada de forma controlada. Influeixen també de manera directa a evitar una contaminació en excés de les aigües pluvials.



Figura 9. Dipòsit del Parc Joan Miró, Barcelona. Font: Ajuntament de Barcelona.

4.2.3. Abocament de l'aigua en un medi receptor

Antigament, les aigües eren conduïdes i abocades directament fins a una llera receptora. Aquesta tendència però, amb els anys s'ha vist modificada per la conscienciació que les aigües pluvials generades per l'escorrentia de les ciutats, no tenen una càrrega contaminant menyspreable i això juntament amb un enduriment de la normativa al respecte, ha causat que tots l'aigua recollida en temps sec es condueixi mitjançant els col·lectors fins al seu destí de depuració. Aquest destí, sovint es una planta EDAR (estacions depuradores d'aigües residuals), i un cop l'aigua ha estat degudament tractada i depurada, finalment és abocada al medi receptor, com ara un riu, embassament o al mar, entre d'altres.



Figura 10. EDAR Granollers. Font: Consorci Besòs-Tordera.

Tot i això existeixen problemes en les xarxes de sanejament unitàries, i és que un episodi fort de pluja, genera un gran problema pel que fa a la gestió de la depuradora perquè altera el procés normal de tractament de les aigües. Si arriba una gran quantitat d'aigües a les estacions, pot provocar que no es pugui emmagatzemar tota l'aigua a les instal·lacions de la pròpia estació, causant que en la majoria dels casos s'hagi de realitzar abocaments d'aigües no tractades al medi

receptor. D'altra banda, també pot ocasionar que l'aigua sobreixi per els sobreixidors cosa que provoca una dispersió d'aigua contaminada sense tractament per els carrers de la ciutat.

4.3. Contaminació d'aigües pluvials

Sovint no hi ha consciència de la gran quantitat de càrrega contaminant dipositada en el carrers i avingudes de les ciutats. En períodes secs, tot i les tasques de neteja municipal, hi ha una gran acumulació de matèries contaminants a la superfície de la ciutat, en forma d'hidrocarburs, pols, plàstics, metalls pesats i altres tipus de residus. En el moment que es produeix una pluja, l'escorrentia generada arrossega tota aquesta càrrega contaminant, i si es supera la capacitat de les plantes de tractament, es pot produir un abocament del tipus CSO (*Combined Sewer Overflow*). Aquests abocaments són perillosos ja que introdueixen al medi natural, directament, les aigües pluvials amb nivells de contaminació elevats. A més a més, en les xarxes unitàries, que és el sistema majoritàriament utilitzat a Espanya, també s'hi suma la fracció d'aigües negres provinents dels habitatges, que incrementa encara més aquest nivell de càrrega contaminant.



Figura 11. Diferents contaminants recollits per l'escorrentia Font: NVCC.

Les situacions més perjudicials, a nivells de contaminació, poden suposar problemes per la vida animal i així com de salubritat en els nostres rius. Aquestes situacions es donen en tots aquells esdeveniments que involucren pluges mitges, i que tenen una intensitat suficient com per arrossegar tota la càrrega contaminant, superant la capacitat màxima d'emmagatzematge tant d'estacions depuradores com de la xarxa de col·lectors.

La major concentració de càrrega contaminant a les aigües té lloc durant els primers minuts de pluja, el que es coneix com a *first flush*. Aquesta situació és perillosa, ja que abocar aquesta aigua en rius i rieres de poc cabal, com són les típiques del litoral Mediterrani, provoca que s'aboqui una petita quantitat d'aigua però amb alts nivells de contaminació. L'aigua de rius i rieres no podrà diluir suficientment tota aquesta càrrega contaminant. A tot això s'ha de considerar l'abocament de matèria orgànica, que degut al procés d'oxidació que genera, pot consumir gran

part de l'oxigen de l'aigua del riu, i causar d'aquesta manera un greu problema per la vida de la fauna aquàtica.

Les aigües pluvials acumulen diferents elements contaminants a les aigües d'escorrentia. Podem trobar classificar-los en:

- **Matèria orgànica:**

Compost per proteïnes carbohidrats, olis i grasses majoritàriament, i també components com dissolvents orgànics i pesticides orgànics. Aquests elements generen greus problemes en el moment que són introduïts al medi, ja que consumeixen gran part de l'oxigen del medi receptor, podent arribar a provocar la mort de la fauna. Per quantificar la seva aparició en les aigües, es calcula mitjançant la DBO (demanda bioquímica d'oxigen) o bé, la DQO (demanda química d'oxigen) o l'oxigen dissolt.

- **Sòlids en suspensió:**

Són partícules sòlides de naturalesa heterogènia que estan associades a grans quantitats de diferents elements contaminants. Són els que es troben més habitualment en les aigües pluvials, i es poden detectar a simple vista ja que es pot apreciar la terbolesa de l'aigua.

- **Patògens:**

Virus i microorganismes, provinents d'animals i aus, provocant problemes d'insalubritat d'aigües i transmissió de malalties.

- **Nutrients:**

Són compostos com ara els fòsfors, nitrogen i altres compostos derivats d'aquests. Provoquen problemes degut a l'eutrofització, que genera un augment de la terbolesa de les aigües, també propicien l'aparició d'algues, i alteren la concentració d'oxigen.

- **Metalls pesats:**

Consisteixen un gran perill per molts microorganismes, animals i plantes. Els metalls pesats més habituals que trobem són els següents: As, Hg, Fe, Mn, Bo, Cu, Pb, Cd, Ni, Cr i Zn. Les concentracions d'aquests metalls, depenen en gran mesura dels usos del sòl de la conca urbana, del trànsit i de les emissions provocades per les indústries properes. Provoquen greus problemes de contaminació a les aigües degut als seus grans nivells de toxicitat.

- **Altres compostos tòxics:**

Com ara derivats del plàstic, hidrocarburs (provinents de la combustió de gasolines i altres compostos derivats del petroli), benzens, herbicides, clorurs etc.

Elemento contaminante	Concentració media
TSS (Sólidos suspendidos totales mg/l)	180-548
DBO (Demanda biológica de oxígeno mg/l)	12-19
DQO (Demanda química de oxígeno mg/l)	82-178
TP (Fósforo total, mg/l)	0,42-0,88
SP(Fósforo disuelto, mg/l)	0,15-0,28
TKN (Nitrógeno Kjeldahl total, mg/l)	1,90-4,18
NO _x (Nitrógeno combinado mg/l)	0,86-2,2
TCu (Cobre Total µg/l)	43-118
TPb (Plomo Total µg/l)	182-443
TZn (Zinc Total µg/l)	202-633

Figura 12. Concentracions mitjanes en l'escorrentia. Font: U.S. Environmental Protection Agency, Programa NURP, Vol. 1. (1983).

4.4. Dificultat dels drenatges en zones urbanes

Degut al èxode rural o bé als moviments migratoris, creix la tendència actual de les societats per concentrar la població en grans ciutats, o en entitats municipals més grans. Aquesta situació comporta una sèrie de conseqüències que alteren considerablement els ecosistemes i les zones naturals que ens envolten. És també el cas de les conques hidrogràfiques, que pateixen greus variacions en el sistema de drenatge natural degut a la pavimentació i la construcció d'edificis. És a dir, la construcció d'una zona urbana on anteriorment hi havia vegetació, suposa una greu alteració dels cicles de l'aigua en la relació a conca natural.

En zones costeres del Mediterrani occidental, en la qual centrarem posteriorment en aquest treball, tenen una tipologia de clima i orografia que facilita l'aparició d'escorrentia superficial i d'aquesta manera, amb més facilitat es produeixen casos d'inundacions en pobles i ciutats. La pluviometria del litoral Mediterrani amb una alta variabilitat entre estacions, és molt imprevisible i difícil d'avaluar. L'orografia de les conques hidrogràfiques, que solen ser de dimensions reduïdes i amb pendents elevades, ajuda a augmentar les velocitats d'escorrentia urbana, i en dificulta per tant la seva captació.

Totes les ciutats Espanyoles del litoral disposen d'un sistema de drenatge artificial, constituït per una xarxa de col·lectors, que dista molt del procés que té la pròpia naturalesa per drenar i evacuar les aigües de la pluja en el medi natural. El sistema bàsicament té una idea de naturalesa radicalment oposada al drenatge natural, ja que el que pretén és l'evacuació de les aigües superficials amb la major rapidesa possible cap a la xarxa subterrània. D'aquesta manera però pot donar lloc a esdeveniments que acabin generant tot el contrari.



Figura 13. Inundació en un pou de registre a la ciutat de de Toronto al 2003. Fotografia: Robert Cerjanec.

La impermeabilització d'una gran extensió de terrenys és un dels condicionants més evidents a l'hora de contribuir als esdeveniments d'inundacions. A les ciutats podem trobar una impermeabilització de fins al 95% de la superfície. Podem considerar per elements impermeables tots aquells corresponents a carrers pavimentats, edificis, terrats, teulades, carreteres, etc. A les ciutats, però, també trobem zones permeables, que funcionen completament diferent a les zones no permeables, i treballen de forma més similar al drenatge natural; en són exemples les zones enjardinades, parcs, solars no edificats etc. Tot i això ens hem de fixar en les zones impermeables de la ciutat, ja que és la part més representativa i la qual suposa el major problema, en temes de drenatge urbà.

En un episodi de pluja, sobre una zona impermeable, els instants de pluja inicial mullen la totalitat de la superfície. D'aquesta aigua en superfície, una fracció en serà evaporada, i l'altre serà acumulada en forats propis del terreny. Si l'esdeveniment de pluja es perllonga en el temps, l'aigua pot circular desplaçant-se per les zones ja mullades prèviament, i es mourà en una direcció o una altre depenent de la pendent existent en el terreny. Per al sistema de drenatge artificial, s'hauran utilitzat les pendents existents i juntament amb els borals conduiran l'aigua fins als elements de captació d'aigües, habitualment els embornals.

El moviment de les aigües per la superfície impermeable en totes les circumstàncies serà per tant d'un moviment en làmina lliure. Moviment que podem entendre a partir de la teoria de l'Ona cinemàtica (V. Monte Hernández y Juan B. Marco Segura, 1992). Però per poder aproximar el moviment al comportament de l'aigua pel que respecta a la hidràulica urbana, depèn de molts altres factors, com ara la pendent, el tipus de terreny i la capacitat d'infiltració d'aquest, la

humitat, el temps i la intensitat de pluja. La llei que ens relaciona tota aquesta informació la trobem a partir de la caracterització de Horton:

$$f = f_o + (f_o - f_b) e^{-K \cdot t}$$

on:

f_o: Capacitat d'infiltració inicial o màxima.

f_b: Capacitat d'infiltració bàsica o mínima.

K: Constant de decaïment.

t: Temps transcorregut de de l'inici del assaig.

Els valors f_o, f_b y K estan associats als terrenys amb cobertura vegetal. Mentre que per la determinació de f_o es realitza en sòls completament secs, i per f_b en sòls totalment saturades.

En la figura següent, veiem un gràfic on es mostra la corba típica d'infiltració sobre un diagrama de pluja:

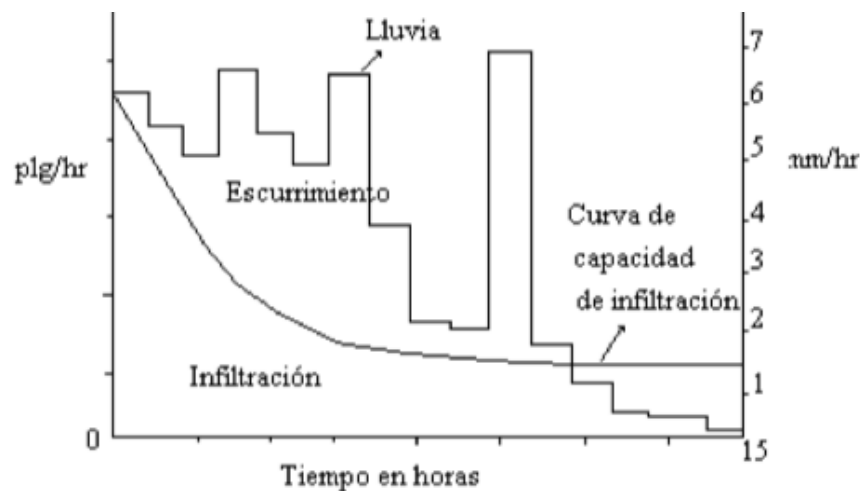


Figura 14. Corba típica d'infiltració sobre un diagrama de pluja.

Tots aquests processos físics i els mètodes de càlcul els podem trobar llargament extensos en (V. Monte Hernandez y Juan B. Marco Segura, 1992).

Generalment si intentem descriure el moviment hídric de les aigües d'escorrentia en un entorn urbà, es pot considerar que aquesta es propaga o bé unidimensionalment o bé bidimensionalment, en règim no permanent en làmina lliure. Si bé es cert que en el cas que el carrer estigui limitat per voreres, l'anàlisi computacional es pot veure reduït, ja que és freqüent utilitzar el model unidimensional (Leandro et al., 2009).

Si es dona el cas d'inundació, pot provocar que la xarxa de clavegueres entri en càrrega, provocant així que els col·lectors estiguin en pressió. Un cop la xarxa de col·lectors ha entrat en pressió, intenta expulsar l'aigua dels col·lectors a través dels pous de registre o embornals, cap a la superfície dels carrers. Per aquesta raó es pot afirmar que els elements de captació d'aigües, també tenen un pes important en els processos d'inundació urbana, generant un flux bidireccional.

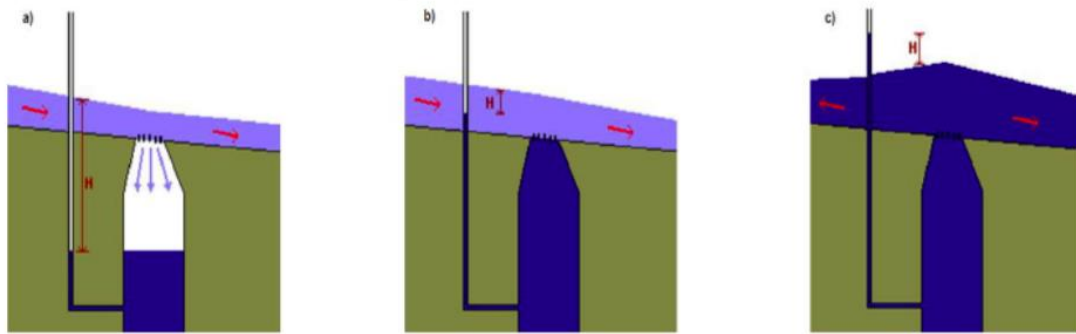


Figura 15. Casos de flux a través d'embornal. A) descàrrega lliure B) Descàrrega de flux submergit cap al col·lector C) Descarrega des de el col·lector cap a la superfície.

Com es pot veure en la figura 15, la direcció del flux en elements de captació està condicionada per la relació entre els nivells piezomètrics entre carrer i col·lector, a l'alçada de l'embornal

En el cas A, podem veure que el nivell d'aigua dins del col·lector no arriba a la superfície, cosa que facilitarà l'entrada d'aigua en làmina lliure en superfície, no influint d'aquesta manera a l'eficiència de l'embornal.

En el cas B, veiem que el nivell piezomètric del col·lector està per sobre de la superfície del carrer, però lleugerament per sota del nivell de la làmina d'aigua. Això comportarà que l'embornal, seguirà captant aigua de la superfície, però condicionada pel nivell piezomètric, reduint així la seva eficiència.

Per últim en el cas C, trobem que el nivell piezomètric del col·lector, es troba per sobre del nivell de la làmina d'aigua en superfície, alterant d'aquesta manera la direcció del flux, i per tant repel·lent l'aigua del col·lector cap a la superfície.

4.5. Conseqüències de les inundacions a les urbs

Un cop constatat el perquè es produeixen inundacions a les zones mediterrànies, cal analitzar el paper que desenvolupen aquestes inundacions en quant a efectes i conseqüències.

Tal com s'ha mencionat anteriorment, el creixement de les ciutats, i els processos cada cop més extrems de pluges intenses en períodes de temps curts, són cada cop més presents, i generen en conseqüència greus problemes d'inundacions en ciutats arreu del món. Aquestes inundacions poden causar greus danys materials, socials i humans per la societat. Això suposa pèrdues econòmiques i malauradament, fins i tot, la pèrdua de vides humanes.

Les inundacions a les ciutats afecten a zones on més concentració de béns materials hi ha, tant públics com privats. Si el calat de l'aigua és suficientment gran com per entrar dins d'edificis i establiments, pot arribar a malmetre bens immobles i productes. Fins i tot pot arribar a causar danys estructurals o deixar atrapada gent a l'interior dels edificis. A més, una part del mobiliari urbà pot ser malmès, com ara contenidors, senyals, arbrat, etc, suposant d'aquesta manera un desgast econòmic per l'administració pública, particulars i companyies d'assegurances.



Figura 16. L'espluga de Francolí 2019. Font: Diari de Tarragona.

Els grans nuclis urbans és on hi ha una major concentració i fluctuació de població en termes de mobilitat i això significa que, si es produeix una situació d'inundació, existeix una probabilitat més alta de risc humà. Les molèsties ocasionades, per una escorrentia suficientment gran, poden provocar diferents situacions de perill per a la vida humana. Els vianants, que molts cops no són conscients de la perillositat de l'aigua, continuen circulant, i si la velocitat de l'aigua és suficientment alta, pot causar el bolcament d'una persona, per arrossegament del flux d'aigua, podent provocar-li així danys físics, i inclús la mort.

Degut aquesta alta perillositat és per la qual ha estat motiu d'estudi en diferents articles, on s'ha intentat esbrinar a partir de quines circumstàncies, l'escorrentia esdevenia perillosa per a la vida humana. El problema és la difícil extrapolació a la realitat dels diferents estudis teòrics, ja que en ells s'han de fer consideracions simplifícatives. Per exemple, s'ha de considerar la persona com a un sòlid rígid, cosa que dista en gran mesura de la realitat.

D'altra banda i sabent que n'és una aproximació, amb la combinació de calats, velocitats i determinant un pes concret del sòlid rígid, que habitualment s'acostuma a prendre de 50kg, es genera un espectre que relaciona tots aquests paràmetres, com es pot veure en la figura següent:

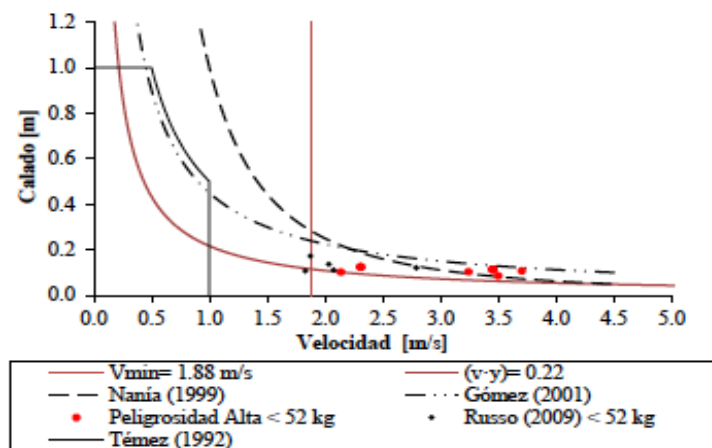


Figura 17. Condicions hidràuliques que han generat situacions de perill altes per persones de 50 kg. Comparativa dels criteris de seguretat de Témez (1992, Nanía (1999) i Gómez (2001). (Font: Inundaciones Urbanas: Criterios de peligrosidad y evaluación del riesgo.

Un altre dels casos d'estudi, és la circulació de vehicles, ja que molts conductors sovint, també inconscientment, decideixen continuar circulant, tot i la gran quantitat d'aigua acumulada, i això pot comportar situacions de pèrdua de control del vehicle, anomenat com a aquaplaning, l'arrossegament del vehicle, o fins i tot quedar atrapat dins el vehicle.



Figura 18. Conseqüències de la DANA. Cartagena 2019. Font: Diario ABC.

En el cas de perillositat per arrossegament de vehicles, també s'han realitzat diferents estudis i criteris d'avaluació. Veiem en tots ells que necessiten d'un calat i una velocitat molt superior a la d'una persona, el que ve condicionat pel pes del vehicle i l'adherència d'aquests.

A continuació es mostra un gràfic on es representen els criteris de perillositat dels vehicles en funció del calat de l'aigua (m) i de la velocitat (m/s):

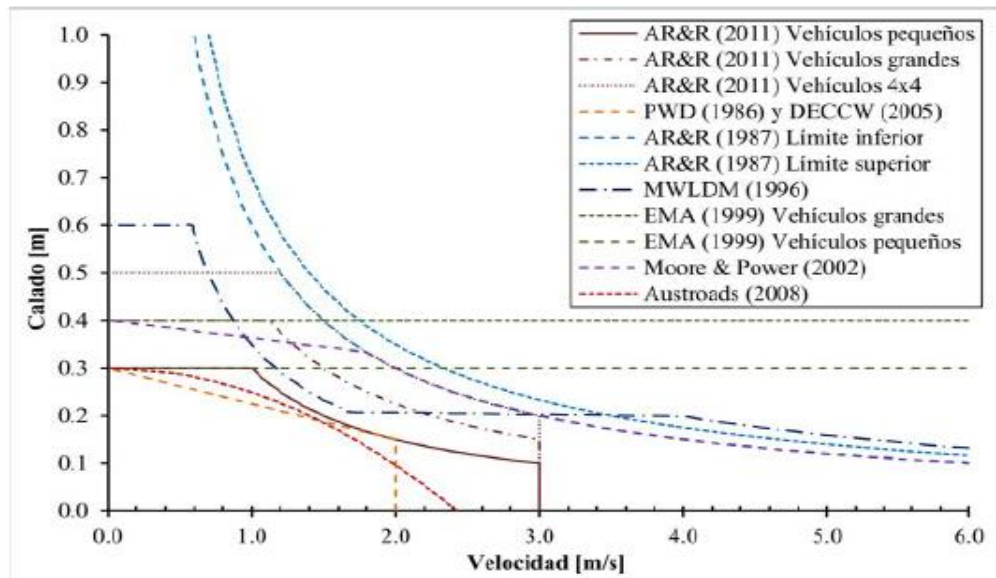


Figura 19. Representació dels criteris de perillositat pels vehicles segons els cabal i velocitats. Font: Inundaciones Urbanas: Criterios de peligrosidad y evaluación del riesgo para peatones y vehículos (Autor: Eduardo Martínez Gomariz).

4.6. Mitigació de les inundacions

Podem afirmar per tant que les inundacions a la zona del litoral Mediterrani, són i seran cada cop més freqüents. Aquesta situació, genera un debat, en el qual la intenció es trobar mesures de mitigació, o reduir al màxim aquesta problemàtica. Tot i això, cap de les mesures és de fàcil realització, ja que o bé, tenen una eficiència reduïda, o bé generen situacions no desitjades a la població, sempre des d'un punt de partida que suposa un alt cost econòmic.

La tendència d'aquestes zones litorals a créixer de forma urbanísticament aigües amunt, sumat a l'orografia de les nostres conques, contribueix a deixar obsoleta les parts antigues de les xarxes de col·lectors. Fins ara, aquesta problemàtica s'ha solucionat mitjançant un augment del diàmetre de la canalització. Aquesta mesura convencional però, té una sèrie d'inconvenients, ja que evidentment i considerant els coeficients de seguretat de l'època en la qual es construeixi, la seva capacitat serà l'adequada. Cal tenir en compte que la capacitat d'aquesta xarxa, la major part del temps serà infrautilitzada, ja que només en circumstàncies de pluges intenses, la xarxa rendirà al 100% de la seva capacitat. Tot i això, pot arribar un punt, que les aigües que arribin fins a aquests col·lectors aigües avall, augmentin considerablement degut al constant creixement de la ciutat, i en conseqüència que la xarxa torni a quedar curta de capacitat, generant així inundacions de nou. En aquest punt, rau la importància d'un bon predimensionament i la

complicació de realitzar-lo. Canviar un col·lector, però, no és simplement canviar el diàmetre del tub, sinó que és altament difícil a nivell constructiu, ja que aquests troben soterrats sota les vies urbanes. Significa que afecta directament al benestar del ciutadà, ja que suposa un tall permanent del trànsit del vial, i afectacions a altres serveis soterrats de la ciutat, com ara electricitat, gas, aigua o xarxa de telefonia.



Figura 20. Obres d'ampliació del col·lector. Font: Joan Mateu Parra (El Periódico).

També s'ha de tenir en compte, que no es pot ampliar la dimensió dels col·lectors infinitament, ja que està condicionat per l'espai disponible. En zones on els carrers són estrets o bé hi ha una alta densitat edificada (més notori en els cascals antics de les ciutats) l'espai per als col·lectors és reduït. Per això arribarà un punt, on la solució utilitzada fins ara, no serà suficient, o bé no podrà ser portada a terme. En aquesta problemàtica, i a la creixent mentalitat de preservar la sostenibilitat de totes les obres civils, sorgeixen noves propostes de mitigació.

Les noves mesures ja no només han de ser eficients a l'hora d'evacuar les aigües pluvials, sinó que també necessiten ser de caire sostenible i social, intentant així respectar al màxim els cicles naturals hidrològics, previs a les modificacions causades per l'home com són els processos d'urbanització.

La filosofia dels Sistemes Urbans de Drenatge (SUDS), és reproduir, de la manera més fidel possible, el cicle hidrològic natural previ a la urbanització o actuació humana, i els seus objectius principals són minimitzar els impactes del desenvolupament urbanístic tant quantitativament com qualitativament de l'escorrentia (en origen, durant el transport i en el destí), així com millorar la integració paisatgística i el valor social i ambiental de l'actuació (The SUDS Manual. CIRIA, 2007). A nivell mundial aquesta nova tendència s'està intentant incorporar i ja veiem l'ús

d'aquests nous Sistemes Urbans de Drenatge (SUDS), també coneguts com BMPs (Best Management Practices) o WSUD (Water Sensitive Urban Design).

Segons el Victorian Stormwater Committee, (VSC, 1999) els objectius principals dels SUDS es podem resumir en:

- Protegir els sistemes naturals del cicle de l'aigua en entorns urbans
- Integrar el tractament de les aigües de pluja en el paisatge
- Protegir la qualitat de les aigües receptors d'escorrenties urbanes
- Reduir volums d'escorrentia i cabals punta procedents de zones urbanes mitjançant elements de retenció i àrees menys impermeables.
- Incrementar el valor afegit minimitzant costos: minimitzar el cost de les infraestructures de drenatge al mateix temps que augmenta el valor del entorn

D'altra banda, una reducció de l'escorrentia i els caudals punta influirà en un millor funcionament de les EDAR, al donar-se les següents condicions:

- Reducció de costos d'operació al reduir-se el volum dels influents.
- Reducció de costos al no alterar-se freqüentment el patró de contaminants per als que no ha estat dissenyada la depuradora.
- Reducció del nombre d'abocaments (CSO) a l'entrada de la depuradora per incapacitat de la mateixa.

Des d'aquesta perspectiva, l'ús de les SUDS no solament millora la gestió de les aigües pluvials, sinó que millora la gestió de l'aigua en general, tant en quant al abastiment com al drenatge i posterior tractament.

Tot i això, resulta difícil la incorporació del drenatge urbà sostenible. Segons Wong (2006), els impediments principals són: la fragmentació institucional, la dilució de responsabilitats, la manca d'incentius, el poc compromís mediambiental, i sobretot la falta d'experiència i coneixement del sector.

	Conventional systems	BMPs
Cost to construct	May be equivalent but potential of multifunctional use of BMPs may reduce overall cost	
Cost to operate and maintain	Established	Unclear for some systems
On-site flood control	Yes	Yes
Down stream erosion and flood control	No	Yes
Potential for water re-use	No	Yes
Potential for groundwater recharge	No	Yes
Potential for pollutant removal	Low	High
Public amenity benefits	No	Yes
Educational benefits	No	Yes
Performance lifetime	Established	Not established for some systems
Land take	Not significant	Dependent on type of system: varies between significant and substantial
Design criteria	Established	Not established for some systems

Taula 1. Comparatiu entre els sistemes convencionals i els SUDS. (Font: DAYWATER. Report 5.1. Review of the Use of Stormwater BMPs in Europe, (2003)).

4.7. Tècniques de drenatge urbà sostenible

Podem classificar les diferents tipologies de tècniques de drenatge urbà sostenible (SUDS), en dos grans subcategories, segons si són mesures estructurals o no ho són.

4.7.1. Mesures no estructurals

Les mesures no estructurals són aquelles que no involucren de forma directa la construcció de cap infraestructura ni cap tipus d'afectació sobre la xarxa de drenatge. Tot i això, sí que tenen influència en els processos d'escorrentia i prevenen la contaminació de les aigües.

Segons (Perales & Andrés-Doménech, 2007) les principals mesures no estructurals són les següents:

- Educar i conscienciar.
- Planificar i dissenyar, en tots els processos de nova construcció.
- Neteja freqüent de superfícies impermeables.

- Controlar l'ús i utilització d'herbicides i fertilitzants.
- Controlar les zones en obres evitant de sediments i productes nocius.
- Assegurar l'existència de procediments d'actuació i equipament adequat per tractar abocaments accidentals mitjançant tècniques sense la utilització d'aigua.
- Limitar el risc que l'escorrentia entri en contacte amb possibles contaminants.
- Controlar les connexions il·legals o no conegudes al sistema de drenatge en cas de xarxes separatives.
- Potenciar i incentivar a la recollida i reutilització d'aigües pluvials, tant a nivell públic com privat.



Figura 21. Campanya de sensibilització #SeTeHaCaído. Font: ECOEMBES.

4.7.2. Mesures estructurals

Les mesures estructurals de les tècniques SUDS són totes aquelles que tenen una relació directa amb algun element constructiu pertanyent a la xarxa de drenatge urbà. Tot i que hi ha moltes alternatives, i a dia d'avui es continua cercant altres propostes i solucions, aquí podem veure les més recurrents o utilitzades:

- Superfícies permeables:

Existeixen diferents tipologies de paviments permeables i tècniques per evacuar les aigües de forma vertical a través dels paviments. Hi ha paviments porosos, que pretenen mitjançant forats o juntes entre els blocs i/o llambordes crear una superfície permeable. També es poden trobar elements mallats de formigó, amb superfície àrida o vegetal a dins d'aquesta, permetent així una infiltració de les aigües. D'altra banda els formigons i asfalts porosos, en els quals s'obvia la part dels fins, aconseguint així una major porositat en la totalitat de la superfície.

- Cobertes verdes:

Les cobertes verdes, més comunament anomenades com a “green roofs”, són sistemes multicapa amb coberta vegetal, que s'utilitzen en terrats i teulades de tot tipus d'edificis. Aquests sistemes ofereixen un gran potencial ja que intercepten i retenen les aigües pluvials d'una gran part de la superfície de les ciutats. Cal destacar que els terrats i teulades representen aproximadament més del 30% del sòl de les ciutats.

- Sistemes d'emmagatzematge:

Aquests sistemes tenen diferents aplicacions i tipologies d'ús, però no només contribueixen a l'acumulació d'aigües per a un futur reaprofitament, sinó que ajuden a laminar el flux d'escorrentia. Permeten que el cabal de sortida del dipòsit sigui menor que el d'entrada, descarregant d'aquesta manera la xarxa en cas d'esdeveniment de pluja. També tenen una funció mediambiental, ja que l'aigua pluvial té una alta càrrega contaminant, i un cop esta estancada al dipòsit, va disminuint la concentració de contaminants degut a la sedimentació d'aquests. Aquesta sedimentació però, produeix una sèrie d'inconvenients a l'hora de dificultar el correcte funcionament dels dipòsits de retenció. Sovint es creen fangs que inhabiliten les estacions de bombeig. Existeixen dipòsits a cel obert, en forma de llacs o estanys artificials, o bé dipòsits soterrats, habitualment sota parcs o infraestructures esportives. També podem trobar dipòsits d'emmagatzematge més reduïts, d'ús privat o col·lectiu en edificis particulars o comunitats de veïns coneguts com “rain barrel”.



Figura 22. Construcció d'un dipòsit soterrat, amb coberta esportiva a Barcelona. Font: CLASBA.

- Cunetes verdes:

Les cunetes verdes, o “swales” en anglès, són bàsicament cunetes excavades les quals no han estat revestides amb formigó, sinó que es pretén que aquestes estiguin cobertes de vegetació. Mentre es condueix l'aigua, que és la funció principal de les cunetes, aquesta permet la infiltració i per tant la reducció de l'escorrentia. Són molt útils situades als vorals de les carreteres, però en canvi, és molt difícils ubicar-les en ciutats i zones urbanes ja que l'espai és reduït i necessiten una

amplada generalment de grans dimensions. Tot i això es poden utilitzar en avingudes, pàrquings i zones residencials, contribuint a l'estètica de la ciutat fent-la més verda.

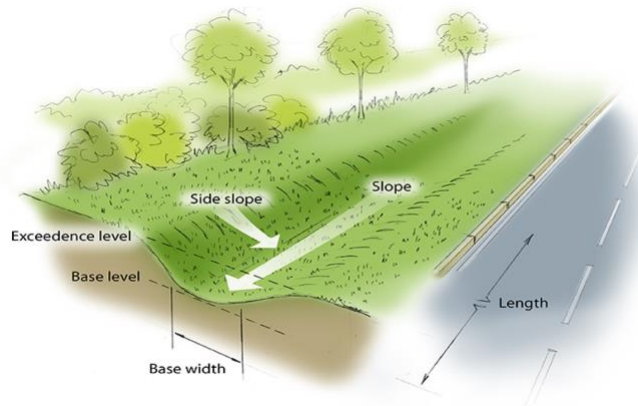


Figura 23. Cuneta verda. Font: Innovyze.

- Sistemes d'infiltració:

Existeixen diferents tipologies de sistemes d'infiltració, és el cas dels pous i rases d'infiltració o els drens filtrants. Tots aquests sistemes tenen com a propòsit afavorir la infiltració de l'escorrentia superficial a les zones urbanes. Els pous i les rases d'infiltració són de tipologia superficial, situades entre 1-3 metres de profunditat excavats i posteriorment omplerts de material drenant a les quals s'hi aboca l'escorrentia de les zones contigües.

4.8. Planejament i normativa del sistema de drenatge pluvial

Els esdeveniments de pluja tenen gran repercussió a les ciutats, i causen problemàtiques com ja hem vist anteriorment, és per aquest motiu, que el planejament de les xarxes de drenatge urbà, té gran importància i influència en el correcte funcionament d'aquest, i així mirar d'evitar danys materials i humans.

És difícil fer un correcte planejament de la xarxa de sanejament, ja que aquesta depèn de molts factors i casuístiques, que es poden produir o no, i a més les ciutats pateixen canvis importants en el temps que varien considerablement els processos hidrològics. El disseny d'aquestes xarxes doncs, es desenvolupa mitjançant anàlisis comparatius i aplicant models matemàtics, que molts cops no acaben d'adequar-se al funcionament real. Per aquest motiu, és molt important la experiència i el judici del equip de projectistes, i un anàlisi i coneixement previs de les condicions de la zona en qüestió per seleccionar i fer un bon planejament dels paràmetres del conjunt de la xarxa.

Abans de començar a aplicar models de càlcul hidrològic, s'han de tenir una sèrie de consideracions prèvies i dades a considerar en el disseny de projectes de drenatges pluvials.

- Tipus d'ús del sòl: És necessari tenir en compte la tipologia de usos del sòl, si és residencial, comercial, industrial, verda, mixta o altres tipus i les corresponents àrees (m^2).
- Densitat de població: En cas de xarxa combinades, s'ha de preveure la densitat de població, per fer un càlcul estadístic del consum d'aigua i residus materials abocats a la xarxa de sanejament (habitants/ha).
- Característiques de la conca: Englobant la topografia, cossos d'aigua, i característiques geològiques.
- Climatologia: És important conèixer les condicions climatològiques, precipitació i la forma en la que tendeix a produir-se, així com intensitats de pluja (mm/h), duració i distribució estacional. Habitualment és definida per gràfics o corbes IDF, que segons diferents períodes de retorn, relacionen la intensitat i la duració de l'episodi pluviomètric.
- Àrea de la conca: L'àrea total de la conca en superfície (ha).
- Tipologia de drenatge: Mitjançant sistemes superficials, canals, o bé sistemes de col·lectors subterrani.
- Materials: Quins materials seran utilitzats per la construcció de canonades i quines propietats i característiques tenen.

Un cop fixades totes les variables i el nivell de seguretat establert, es pot procedir al càlcul dels cabals estimats de disseny. Habitualment, i encara avui, s'ha empleat el mètode de càlcul anomenat racional, que facilita el cabal màxim a la sortida de la conca, però que per altra banda, té l'inconvenient que no dona informació del comportament del fluid per la conca ni quina dinàmica té. Per tant no es pot saber l'evolució de l'escorrentia al llarg del temps, ni el moment en que es produirà el cabal màxim, dificultant així la tasca de mitigar possibles inundacions.

D'altra banda existeixen alternatives a aquest model de càlcul, com ara les aproximacions d'ona cinemàtica en un pla inclinat. Programes lliures com el SWMM v.5 o HEC-HMS, o de pagament com InfoWorks que utilitzen aquestes funcionalitats, i és per això que suposen un avenç a l'hora de càlculs d'escorrentia i de distribució d'aquesta a través de la superfície de les àrees urbanes. És significatiu però, que aquests programes, no s'utilitzin de forma freqüent, i això rau, en molts casos, a una falta d'interès per part de les administracions.

5. Cas d'estudi: Granollers

5.1. Presentació

Fins ara s'ha analitzat l'estat del coneixement pel que respecta a les xarxes de drenatge urbà i les problemàtiques actuals en termes d'inundabilitat de les ciutats. Tot això sumat als més que evidents canvis a nivell meteorològic que està el canvi climàtic actual.

Aquest apartat es centrarà en l'estudi comparatiu del funcionament d'una xarxa de drenatge urbà en condicions pluviomètriques actuals i en condicions futures, amb la finalitat de donar resposta a diferents preguntes:

- L'alteració climàtica pot acabar provocant un canvi en el funcionament de les xarxes actuals prou gran com per provocar més problemàtiques que les ja existents? És significatiu com per ser digne d'estudi i donar-li més importància?
- En cas que els esdeveniments de pluges siguin més intensos en un futur, estarien preparades les xarxes de drenatge urbà actuals, per suportar esdeveniments de pluges més intensos?
- En cas negatiu, quines mesures de mitigació o alternatives es podrien proposar?

Per donar resposta a la primera pregunta, ens hem de fixar en estudis ja realitzats prèviament, com la Tesis doctoral "*Effects of bottleneck blockage on the resilience of an urban stormwater drainage system*" (Saeed Mohammadiun, 2019), juntament amb investigadors de la Universitat de Columbia Britànica. Aquest estudi determina que les xarxes de drenatge actuals. Estan preparades i dissenyades a partir de mètodes de disseny convencionals, i que aquests només funcionen de forma correcta en les condicions previstes de càrrega. Amb això, asseguren que els sistemes actuals es queden curts a l'hora de poder resistir esdeveniments de pluges i tempestes de més altes intensitats, i que en un gran nombre de situacions fins i tot es poden donar errors de funcionament.

D'aquí podem extreure, doncs, una resposta a la primera pregunta i dir, que, es necessiten xarxes de clavegueram més resilients. Això no només significa disposar d'una major capacitat de càrrega, sinó a la realització dels estudis pertinents tant del disseny com dels elements constructius adequats. A tot això s'han de realitzar estudis en els quals es tinguin en compte diferents incerteses, com ara diferents escenaris i intensitats de pluges, casos d'avaría d'algun dels trams o bé condicions meteorològiques dels efectes del canvi climàtic. Amb tot això, podem concloure que, sí és necessari fer una revisió dels projectes de xarxes de drenatge urbà, i

realitzar-ne estudis i projectes en els quals es posi a prova el seu funcionament, proporcionant d'aquesta manera la importància que hauria de tenir.

Pel que respecta, tant a la segona com la tercera preguntes, són qüestions que tenen una difícil resposta, ja que està condicionada per les característiques de ciutat o població tractada, així com altres factors, com pot ser la climatologia, qüestions històriques i urbanístiques o simplement per temes pressupostaris.

Per aquest motiu s'intentarà donar resposta a partir de diferents simulacions d'esdeveniments de pluja, en el cas d'un municipi del litoral mediterrani català, concretament, la ciutat de Granollers.

Aquest treball té la finalitat d'aportar dades concretes a partir de simulacions, que permetin tenir una visió més detallada, de com podria afectar el canvi climàtic a la gestió de les infraestructures dedicades a la recollida d'aigües pluvials. A més d'intentar posar sobre la taula mesures per intentar pal·liar o mitigar, en la mesura del possible, possibles problemàtiques o afectacions, tenint present que són instal·lacions, en general, de difícil accés. Això significa, que és necessària una gran despesa econòmica a l'hora d'introduir qualsevol canvi.

Per dur a terme aquest estudi, es realitzaran dos escenaris, un situat en un esdeveniment de pluja actual del període de retorn utilitzat habitualment en disseny de xarxes, 10 anys, i l'altre, ubicat en un esdeveniment de pluja suposat al 2050 i de mateix període de retorn. Això permetrà comprovar el funcionament de la xarxa en ambdós casuístiques, i comparar-ne els resultats obtinguts, en termes quantitatius i qualitatius de l'escorrentia.

Per dur a terme aquest cas d'estudi s'utilitzaran simulacions dels processos pluja-escorrentia i la propagació de cabals en la xarxa, mitjançant el software de càlcul *Storm Management Model* (SWMM) desenvolupat per la *U.S. Environmental Protection Agency* (EPA).

5.2. Zona d'estudi

5.2.1. Descripció de la zona d'estudi

El municipi de Granollers es troba localitzat a la Província de Barcelona (Espanya), i és la ciutat més densament poblada del Vallès Oriental i també n'és la seva capital. Està situada a la depressió prelitoral catalana, al sector oriental de la Plana del Vallès, entre la serralada Litoral i la Prelitoral, amb un relleu que combina les planes al·luvials i serres de poca altitud interfluvials.

Aquest relleu pla en concordança amb les petites serralades, generen un clima alternant, molt característic del Mediterrani, és per això que els rius vallesans tenen un regim hidrològic mediterrani, el que vol dir que el seu cabal normalment és escàs i presenta considerables oscil·lacions temporals: un fort estiatge a l'estiu i la possibilitat d'experimentar importants crescudes després d'episodis de pluges copioses. Pel que fa a la xarxa hidrogràfica de la plana del Vallès, principalment forma part de la conca del Besòs, tot i que en alguns punts hi ha un drenatge cap al Tordera i al Llobregat.

Si ens fixem més concretament en la orografia de la pròpia ciutat de Granollers, podem apreciar com el casc antic de la ciutat està situat just a la llera esquerra del riu Congost, que és afluent del Riu Besòs. Pel que fa a la orografia, la ciutat segueix bàsicament el curs del riu, que flueix en direcció sud, és a dir trobem les cotes més altes al nord i les més baixes al sud. Per altra banda, veiem que la ciutat està ubicada en la plana al·luvial, amb la conseqüent, el riu al llarg del seu pas per la ciutat tindrà la cota més baixa, i en els seus laterals hi ha carenes amb pendents suaus. Situació semblant a Barcelona, on s'ha creat la macro-conca del Bogatell, àmpliament detallat per Arandes (1992).

Pel que fa a la xarxa de sanejament de la ciutat de Granollers, s'ha de tenir present, que absorbeix directament les aigües de pluja dels pobles contigus, com són Canovelles i Les Franqueses del Vallès, que juntament amb Granollers conformen un mateix teixit urbà. D'aquesta manera es forma una xarxa de col·lectors, per gravetat, d'aproximadament 22.200m fins a la EDAR (Estació Depuradora d'Aigües Residuals), que pertany al mateix terme municipal de Granollers.

En la següent figura es mostra una ortofoto en detall l'entramat urbà sobre el territori del terme municipal de Granollers.



Figura 24. Ortofoto de la ciutat de Granollers. Font: Institut Cartogràfic de Catalunya.

5.2.2. Característiques de la zona d'estudi

5.2.2.1. Usos del sòl

Granollers com part de la plana del Vallès, ha experimentat transformacions paisatgístiques considerables, durant diferents períodes temporals. Aquests canvis han estat generats o bé per fenòmens naturals transformadors del territori o bé a causa de l'acció de l'espècie humana.

La humanitat al llarg de la seva història ha anat modelitzant el territori, per adaptar-lo a les seves necessitats. A Granollers hi han hagut transformacions des del període de romanització, passant per l'època feudal amb el respectiu auge de l'agricultura. Posteriorment, èpoques com la industrialització i l'augment exponencial de població, amb la conseqüent urbanització de la ciutat al llarg del territori natural, han acabat alterant encara més el paisatge. Finalment les connexions en forma de infraestructures com la xarxa viària i ferroviària ha significat un gran desplegament humà pel territori.

En la següent figura () es mostra l'evolució històrica dels canvis paisatgístics de la vall del congost, on es localitza Granollers. Es basa en una reconstrucció dels perfils de la Vall del Congost des del 5000 a.C. fins a la dècada dels 90.

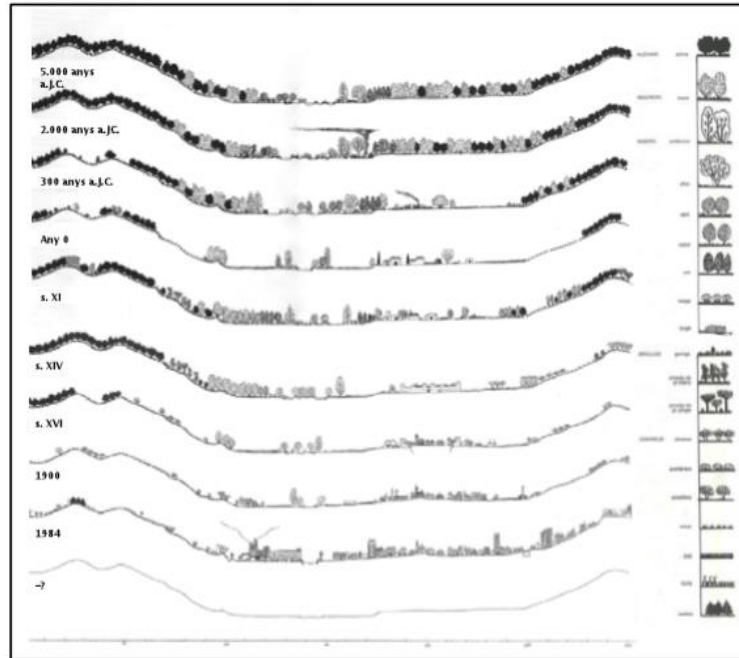


Figura 25. Reconstrucció paisatgística de la zona que ocupa la ciutat de Granollers en diferents èpoques. Font: *Els orígens de Granollers i el Vallès Oriental (1984)*.

Les cobertes del sòl són un dels elements a destacar, per a fer un bon anàlisi de la influència de la humanitat sobre el terreny, i que en termes de hidrologia urbana permet fer una aproximació pel que fa al nivell de impermeabilització i coeficients de infiltració i escorrentia. El terme de cobertes del sòl fan referència a les condicions biofísiques que hi ha en superfície terrestre, és a dir, si la zona està composta per bosc, àrea conreable, urbanització, infraestructura, entre d'altres.

En el Pla de Paisatge de Granollers (2006), es va realitzar un estudi comparatiu de les cobertes del sòl. Al 2006, Granollers comptava amb:

- 47,6 ha de Boscos, suposant 3,20% de la superfície total
- 139,0 ha de Matollars i herbassars, suposant 9,39% de la superfície total
- 5,60 ha de Zones Nues, suposant 0,38% de la superfície total
- 4,70 ha de Rius i Aiguamolls, suposant 0,32% de la superfície total
- 431,50 ha de Zones de Conreu, suposant 29,02% de la superfície total
- 764,10 ha de Zones Urbanitzades, suposant 51,38% de la superfície total

- 84,60 ha d'Infraestructures, suposant 6,36% de la superfície total

Per tendència general s'aprecia un augment considerable de les zones urbanitzades així com d'infraestructures. També es pot apreciar un lleuger augment de les zones de matollars i herbassars. D'altra banda un fort descens de zones de conreu, suposant una pèrdua d'aproximadament 200 ha, entre els anys 1993 i 2006.

En la següent figura es mostra el plànol de Granollers, diferenciant les diferents zones segons les diferents cobertes del sòl.

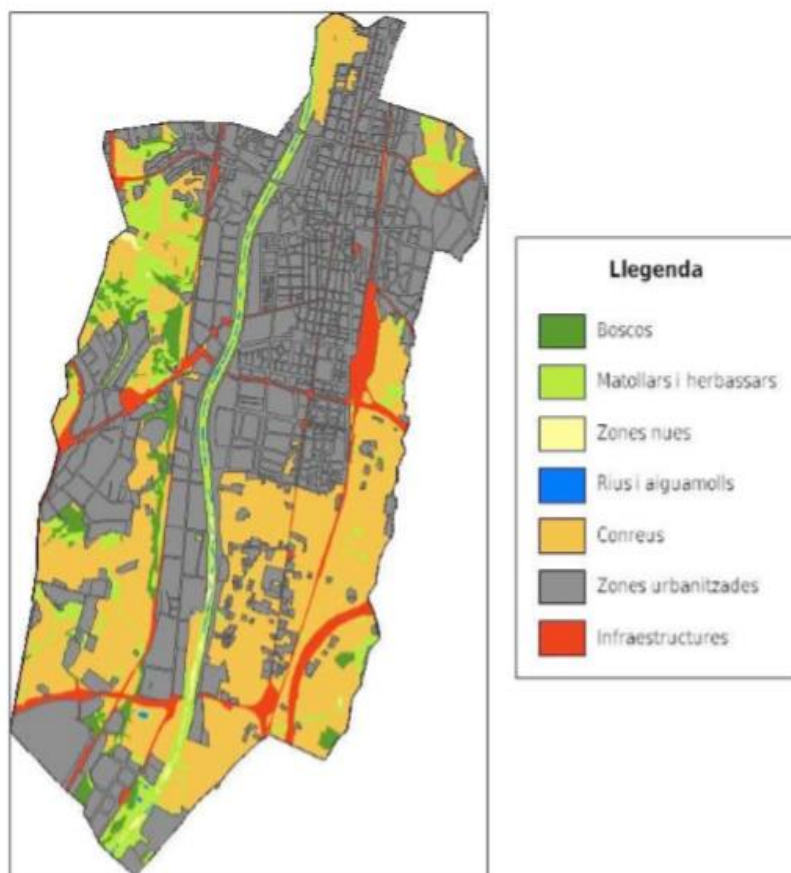


Figura 26. Plànol de cobertes del sòl de Granollers 2006. Font: Pla de paisatge de Granollers.

Segons les cobertes del sòl es pot determinar les impermeabilitats del terreny. En la figura següent es mostren el grau d'impermeabilitat de les diferents subconques utilitzades en la modelització amb el software SWMM v.5.1.

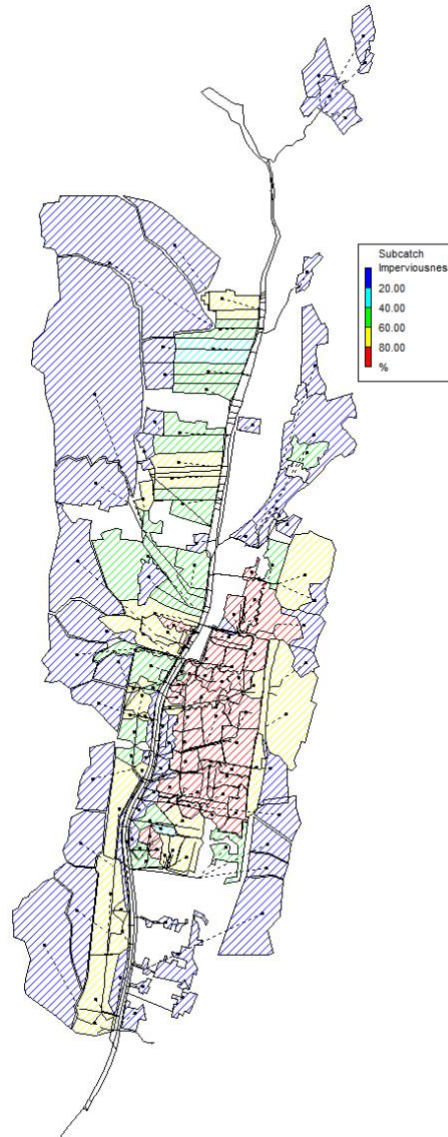


Figura 27. Representació de la impermeabilitat del terreny a la ciutat de Granollers.

En la *figura 27* es pot apreciar, com les subconques externes de la ciutat, que són aquelles que estan compostes per més zona rural, tenen un grau petit d'impermeabilització. En canvi les zones industrials ja tenen impermeabilitats entre el 40 i el 80%. Pel que fa a les zones residencials la impermeabilitat no baixa del 60%, i en el cas antic de la ciutat és sempre superior al 80%.

5.2.2.2. Climatologia de Granollers

5.2.2.2.1. Climatologia Actual

La climatologia corresponent a la localitat de Granollers, és de tipologia Mediterrània, amb una alta variabilitat a nivell pluviomètric. Cal tenir en compte que hi ha una variació pel que fa a la distribució mensual de les acumulacions de precipitació tal com es pot apreciar en la figura següent:

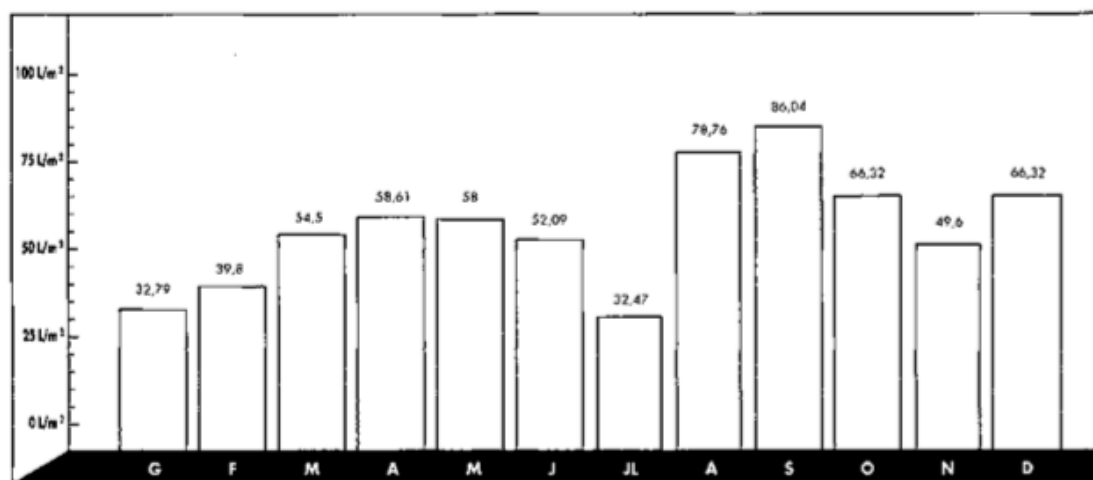


Figura 28. Distribució mensual de les Pluges a Granollers. Font: Estudi de la Climatologia de Granollers, Rosa Bruch i Anna Pellicé.

La precipitació mitjana anual de Granollers entre els anys 1950 i el 2019 és de 554 mm. Tot i això no es no segueix una tendència constant, si no que es poden trobar anys especialment plujosos. Si ens hi fixem en detall, es pot apreciar que l'origen d'aquests anys amb més precipitació són degut a esdeveniments de pluges extraordinàries. Per exemple, l'any més plujós va ser 1982, on tan sols amb 66 dies de pluja durant l'any, amb episodis de pluges molt elevades, com els 201mm que varen caure en només 7 dies al Febrer. Aquest fenomen propi i freqüent del clima mediterrani, provoca llargs períodes de sequera que poden venir acompanyats posteriorment fortes precipitacions, torrencials en alguns casos, que poden arribar a inundar carrers i zones urbanes.

A continuació es mostra un gràfic realitzat a partir de les dades del Servei Meteorològic de Catalunya, on es pot apreciar les precipitacions anuals totals, des de l'any 1950 fins a l'actualitat:

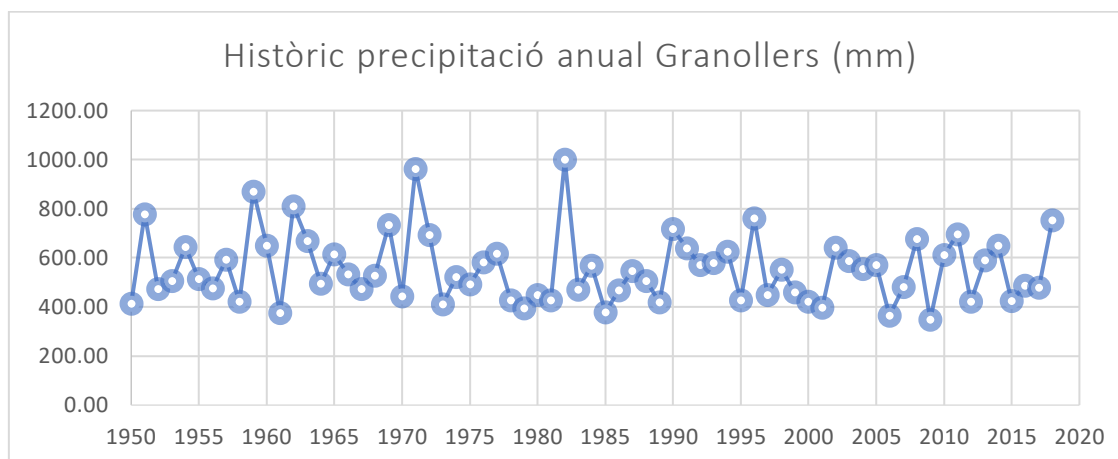


Figura 29. Pluviometria històrica de Granollers. Realitzat a partir de dades extretes del Servei Meteorològic de Catalunya.

5.2.2.2.2. Projeccions de futur de la precipitació

Les estimacions de com pot evolucionar la climatologia en un futur, són importants a l'hora d'avaluar els impactes del canvi climàtic i establir possibles mesures de mitigació. Però com totes les previsions, no deixen de ser estimacions i per tant no es pot afirmar amb total seguretat què serà el que depararà el futur.

Tanmateix, és un tema àmpliament estudiat amb infinitat de casuístiques i variables aplicades. En el cas de considerar un canvi climàtic, es generen projeccions climàtiques a partir d'escenaris d'emissions de gasos i altes concentracions de partícules contaminants, que contribueixen d'aquesta manera a un efecte hivernacle.

Cada projecció dependrà, per tant dels nivells de concentració considerats. Segons l'evolució de cada territori i el desenvolupament socio-econòmic, s'hauran de suposar uns valors o uns altres, intentant crear així l'escenari més realista possible. En aquest cas l'orografia i les condicions atmosfèriques de cada regió o territori, són un factor condicionant també a l'hora de poder realitzar previsions acurades dels respectius estudis.

Per aquest motiu, és important no solament realitzar simulacions i informes a nivell mundial, com ho realitza el *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), sinó que delegar a escala regional l'estudi de cada zona en concret, aconseguint així una major precisió a escala local.

En el marc Europeu trobem projectes com el *Collaborative Research on Flood Resilience in Urban Areas* (CORFU), que col·laborant amb diferents institucions mundials té com a missió principal l'estudi dels possibles impactes que poden tenir les inundacions, en termes de possibles defuncions, danys en infraestructures i altres problemes derivats. En el projecte CORFU, una de les ciutats seleccionades va ésser Barcelona, seleccionada degut a les seves peculiaritats, de clima Mediterrani i també per la seva alta densitat urbana, el que equival a una alta impermeabilitat, així com el seu desenvolupament industrial, generador de partícules contaminants.

A nivell català, també existeixen diferents projectes, és el cas de l'ESCAT, que pertany al Servei Meteorològic de Catalunya, i que juntament amb el BSC (Barcelona Supercomputing Center) pretén obtenir les projeccions climàtiques amb una resolució de 10km, en el territori català. Aquest informe utilitza tres escenaris d'emissions (A2, A1B i B1) extrets del (IEEE), l'informe Especial sobre Escenaris d'Emissions (2000). També hi trobem projectes que tenen la voluntat de establir escenaris climàtics futurs des de l'actualitat fins al 2101, amb una molt alta resolució

(1km), en aquest cas el projecte ESAMB, encarregat al Servei Meteorològic de Catalunya per part de L'Àrea Metropolitana de Barcelona (AMB).

A continuació es pot apreciar l'estudi de les anomalies de precipitació a l'àrea metropolitana de Barcelona, recollides per el projecte ESAMB:

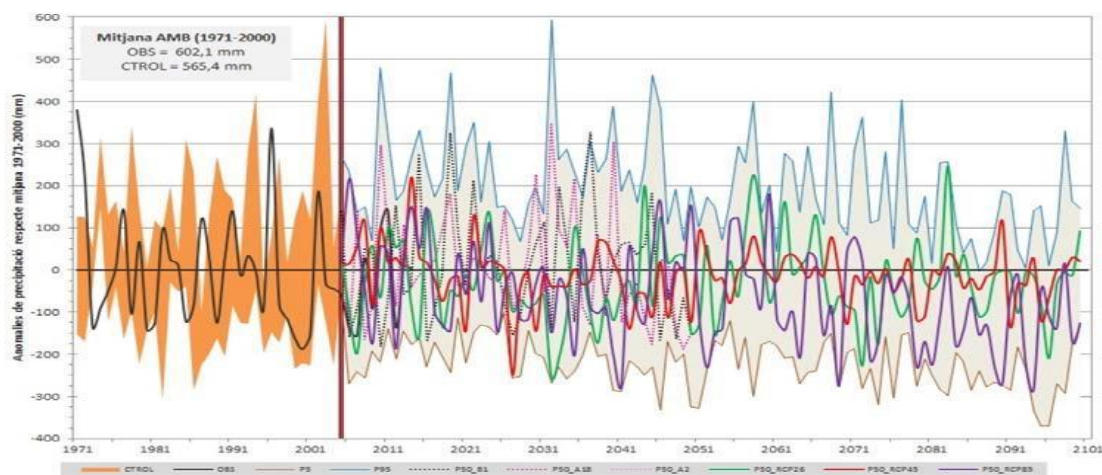


Figura 30. Escenaris climàtics regionalitzats a l'Àrea Metropolitana de Barcelona. Font: Projecte ESAMB.

El *tercer informe sobre el canvi climàtic de Catalunya (2016)* (TICCC), detalla les projeccions climàtiques en període comprès entre 2021-2050, respecte el període entre 1971-2000, basant-se en múltiples simulacions i projectes, però principalment en el projecte ESCAT. En tal informe es conclou que tant en termes de precipitació com de temperatura, es veurien alterats. A partir dels resultats obtinguts en podem extreure les següents conclusions (segons *Calbó et al., 2016*):

- Un increment significatiu de l'ocurrència de mesos càlids.
- Disminució de nits de glaçada, principalment al Pirineu Català.
- Disminució de la precipitació anual mitjana
- La probabilitat d'ocurrència dels episodis de pluja diària <200 mm en un període de 24 hores consecutives, entre 2021-2050, es duplicaria respecte al període 1971-2000.
- La probabilitat dels episodis de pluja superiors als 500 mm en un període de 24 hores consecutives deixaria de ser nul·la, com ho és des de 1971 fins a l'actualitat.
- La durada de les sequeres podria augmentar significativament, partint de la combinació de l'augment projectat de temperatura i el descens de precipitació anual.

5.3. Descripció de la xarxa de drenatge

Actualment la ciutat de Granollers disposa d'una xarxa de drenatge unitària, formada per col·lectors i galeries subterrànies, formant una xarxa de més de 135 km de longitud, en la seva

superfície de 14,9 km². Els conductes, majoritàriament de forma circular i de formigó, tenen diferents diàmetres segons els seus usos, i el seu rang varia des dels 200mm fins als 500mm i en el cas de les galeries més grans arriben als 2900x2000mm.

Els elements de captació d'aigua en superfície estan compostos per uns 5800 embornals i unes 300 reixes. Disposant d'una totalitat de 3500 pous de registre, el que equival a dir que la xarxa es disposa d'un pou per cada 43 metres.

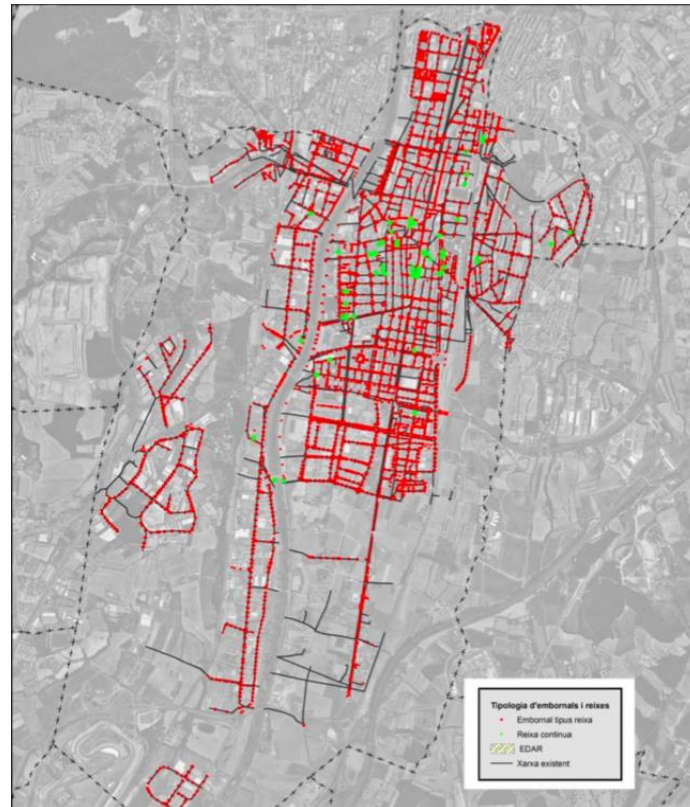


Figura 31. Disposició d'embornals i reixes a la Ciutat de Granollers. Font: Drenatges Urbans del Besos, S.L.

Actualment la xarxa de clavegueram, segons el Pla Director de Clavegueram de Granollers (2015), es troba en bon estat de conservació. En el Pla Director, s'analitza l'estat de la xarxa segons els següents factors:

- Estructurals: Antiguitat, materials utilitzats, i deficiències detectades utilitzant les inspeccions CCTV.
- De risc: condicions de trànsit pesat i arrels d'arbrat.
- Hidràulics: determinant la modelització de la xarxa.

Segons aquests criteris es va categoritzar l'estat dels 135 km lineals de xarxa de clavegueram, de la forma següent:

- Trams en estat excel·lent: 0,4 km
- Trams en estat bo: 96,8 Km
- Trams en estat regular: 34,0 km
- Trams en estat dolent. 7,8 km
- Trams en molt mal estat: 1,0 km

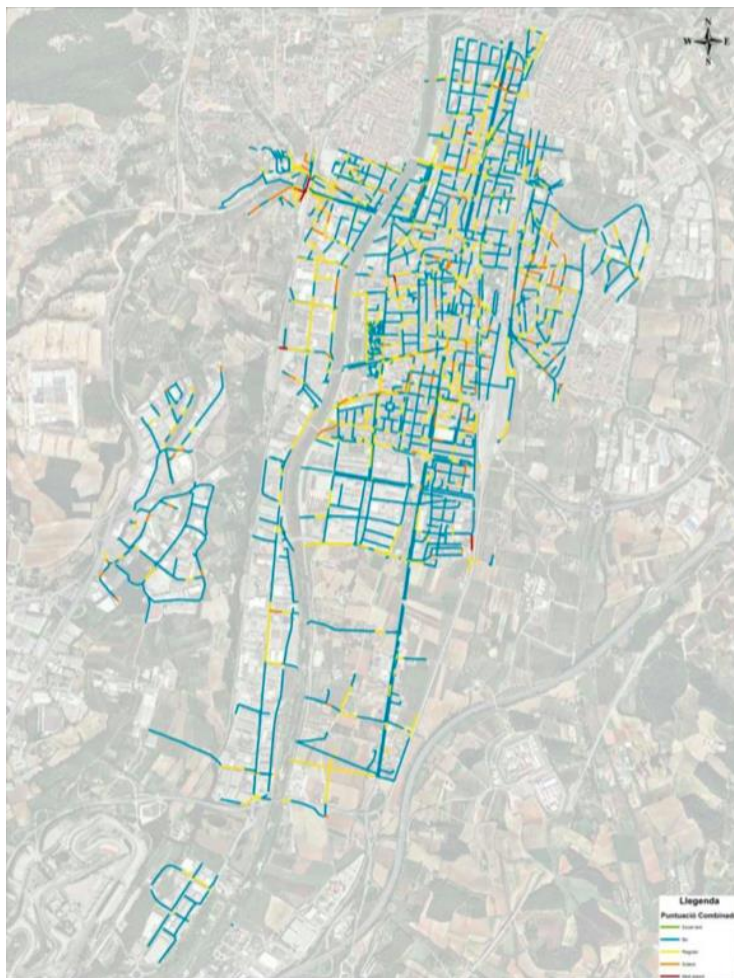


Figura 32. Estat de la xarxa de clavegueram. Font: Drenatges Urbans del Besos, S.L.

5.3.1. Model de la xarxa de drenatge

En aquest treball s'utilitzarà un model que intenta simular el funcionament de la xarxa de la manera més realista possible. Per portar a terme un estudi exhaustiu, s'ha de dividir la totalitat de la conca en diferents subconques més petites. D'aquesta manera s'aproxima de forma més precisa les diferents propietats del terreny, com ara impermeabilitzats, pendents, rugositats etc. En el model de càlcul utilitzat en aquest treball mitjançant EPA SWMM v.5.1, es delimiten una totalitat de 144 diferents subconques. Aquesta gran nombre de divisions efectuada és degut a les dimensions del municipi. Cal considerar que en el model d'estudi es consideren només l'àrea

de terreny en zona urbana. De la totalitat dels 14,9 km² de superfície del municipi de Granollers, el sòl urbà correspon a 4,95 km².

D'altra banda en aquest model es tenen en compte conductes i canalitzacions de fins a 800 mm de diàmetre, i sumen un total de 1285 links. Aquest nombre elevat de links, representa un total de 72,7 km lineals de xarxa. Pel que fa a nodes o pous de registre, se'n han considerat un total de 1261 que és una xifra suficientment alta per el dimensions de xarxa real.

6. Simulació amb el software SWMM v5.1.

6.1. Presentació del software

El Software SWMM (Storm Water Management Model), és un codi de càlcul hidrològic i hidràulic de simulació dels processos pluja-escorrentia. Va ser desenvolupat als Estats Units d'Amèrica, per USPA (United States Environmental Protection Agency) entre els anys 1969 i 1971, motivat per l'aparició dels primers ordinadors moderns i de la creixent preocupació per les inundacions urbanes i les conseqüències dels continus abocaments de contaminants en el medi.

Té com a objectiu principal, simular el comportament hidrològic del sistema de drenatge urbà des d'un punt de vista qualitatiu i quantitatiu de l'escorrentia. És un model lliure, per al Sistema operatiu Windows, cosa que ha facilitat l'accés a un gran nombre de persones, arribant a ser un dels softwares de referència a nivell de modelització hidràulica.

En les primeres versions el programa efectuava càlculs mitjançant rutines. En l'última versió que trobem disponible, llançada el 2018 SWMM 5.1.013, realitza un càlcul del model de dipòsit no lineal, utilitzant el llenguatge de programació C i sobre els principis de conservació de la massa i de la quantitat de moviment, per calcular l'escorrentia, cabals, calats, velocitats i concentracions, provinents d'un procés de pluja determinat a partir d'una sèrie de paràmetres com ara l'àrea, les pendent, rugositat del terreny o permeabilitats, entre d'altres. Aquest model té en compte també els processos d'infiltració, evaporació, estancament d'aigües, etc. En el cas del procés d'infiltració, pot ser calculada mitjançant el mètode de Horton, el mètode de Green-Ampt o el del número de corba NRCS.

Pel que fa al càlcul del flux en dita xarxa de drenatge, el EPA SWMM 5.1, permet escollir tres diferents metodologies de càlcul. La primera, *Steady Flow Routing*, consisteix a assumir un flux permanent, és a dir les condicions del flux no canvien respecte el temps.

En segon lloc trobem la metodologia anomenada *Kinematic Wave*, o ona cinemàtica, i en aquest cas sí que es considera la variabilitat temporal del flux. El tercer mètode és el referent a la *Dynamic wave*, o ona dinàmica, corresponent a la resolució de les equacions de Saint Venant (conservació de la massa i quantitat de moviment), que és el que és més adequat a nivell físic, però que comporta un major cost computacional.

En aquesta última versió de EPA SWMM 5.1, és possible modelitzar tot tipus de xarxes, tant conductes oberts com tancats, tant en condicions de làmina lliure com d'entrada en càrrega en

el cas de conductes tancats. En el SWMM 5.1 és possible incorporar en el model d'estudi abocadors d'aigües, sistemes de bombeig i orificis de captació d'aigües.

Per tant, bàsicament SWMM 5.1, permet modelitzar el cicle de l'aigua en un entorn urbà, i és capaç de modelitzar tant xarxes separatives com unitàries així com conques i lleres naturals. Els principal elements o objectes que podem utilitzar en el programa són els següents:

- Subconques (*Subcatchment*): determinen una àrea en concret, amb una sèrie de característiques homogènies i transformen la pluja en escorrentia, que evacuarà tota en un mateix punt.
- Pluviòmetre (*Rain Gauge*): permet crear i utilitzar sèries temporals pluviomètriques, tant puntuals com continues en el temps.
- Pous (*Nodes*): representen tots aquells elements que serveixen de nodes de canvi de direcció, pendent, o bé pous de registre. No tenen capacitat de retenció.
- Conductes (*Links*): representen tots els elements que s'encarreguen del transport del flux d'aigua.
- Abocament (*Outfall*): representa el final de la xarxa de drenatge i el seu abocament a un medi receptor.

La totalitat dels elements pot ésser consultada més extensament en el manual d'usuari de EPA SWMM 5 (User's Manual).

El programa considera el sistema de drenatge com a una col·lecció d'aquests elements dins d'una sèrie de capes, però no necessàriament totes les capes han d'aparèixer en un model. Cada capa agrupa una tipologia de processos hidrològics, com per exemple, en la capa atmosfèrica hi trobem els *Rain gauges*, en la capa relativa al terreny, hi trobem els *subcatchments*, i finalment en la capa de transport, trobem tots els objectes referents al transport d'aigües, com són els nusos, *nodes*, els connectors, anomenats *links*, o punts finals d'abocament d'aigües, *outfalls etc.*

En la següent figura es mostra l'entramat de la xarxa de drenatge urbà del municipi de Granollers, compost per subconques, pous de registre i conductes, que posteriorment s'utilitzarà per simular el funcionament d'aquesta en l'aplicació de diferents processos de pluja:

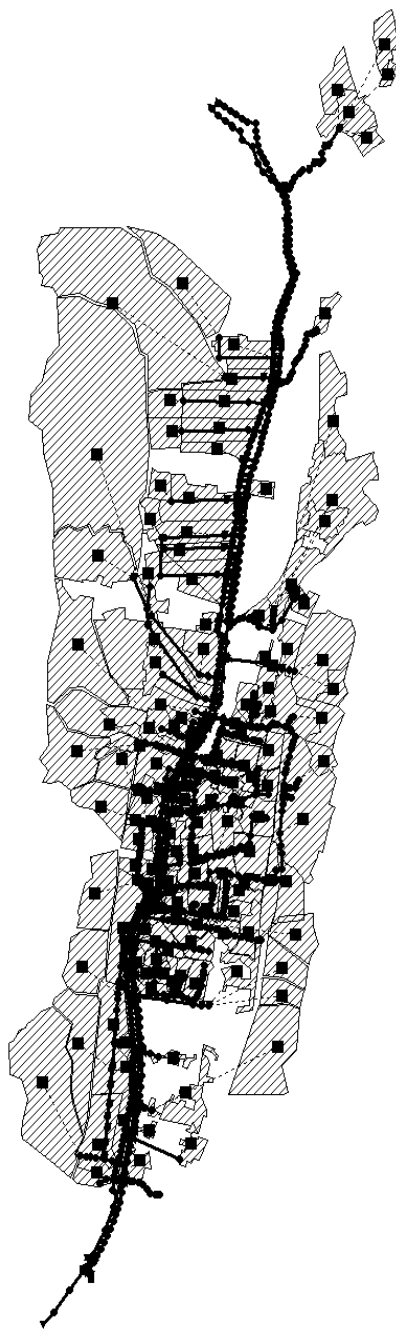


Figura 33. Model de la xarxa de drenatge urbà de Granollers utilitzada amb el software SWMM5.

6.2. Selecció de pluges de projecte

En aquest capítol es discutiran els motius de selecció de les pluges representatives. Un cop s'han detectat les necessitats i s'han definit els objectius del cas d'estudi, i amb quin mètode de simulació es modelarà, es planteja doncs, quina ha de ser la pluja que més s'adequa a cada una de les dos casuístiques.

En ambdós casos, la simulació, constarà de l'aplicació d'una pluja de disseny com a dada pluviomètrica. S'escull la utilització d'una pluja de disseny, ja que aquesta és l'esdeveniment

hipotètic pluvial de més intensitat. És associada a una pluja teòrica en un determinat període de retorn, una duració donada que permeten la simulació dels models pluja-escorrentia.

6.2.1. Episodi de pluja del Cas 1

En el Cas 1, es pretén avaluar la xarxa de drenatge urbà existent segons una pluja característica de l'actualitat, és a dir al 2020. Per aquest motiu, per l'elecció de la pluja de disseny d'aquest cas, s'ha de cercar una pluja representativa del moment present representada en forma de hietograma d'intensitat de pluja. Els hietogrames relacionen la intensitat de pluja segons la duració total del 'esdeveniment de pluja, representada en diferents intervals de temps.

Per al cas 1, s'ha escollit la utilització de la pluja de disseny proposada pel projecte CORFU, del qual ja s'ha parlat anteriorment. S'escull la pluja de disseny PLUBARNA 2010 IIA, amb una duració de 55 minuts per un període de retorn de 10 anys. En la següent figura es mostra el hietograma complet de la pluja seleccionada:

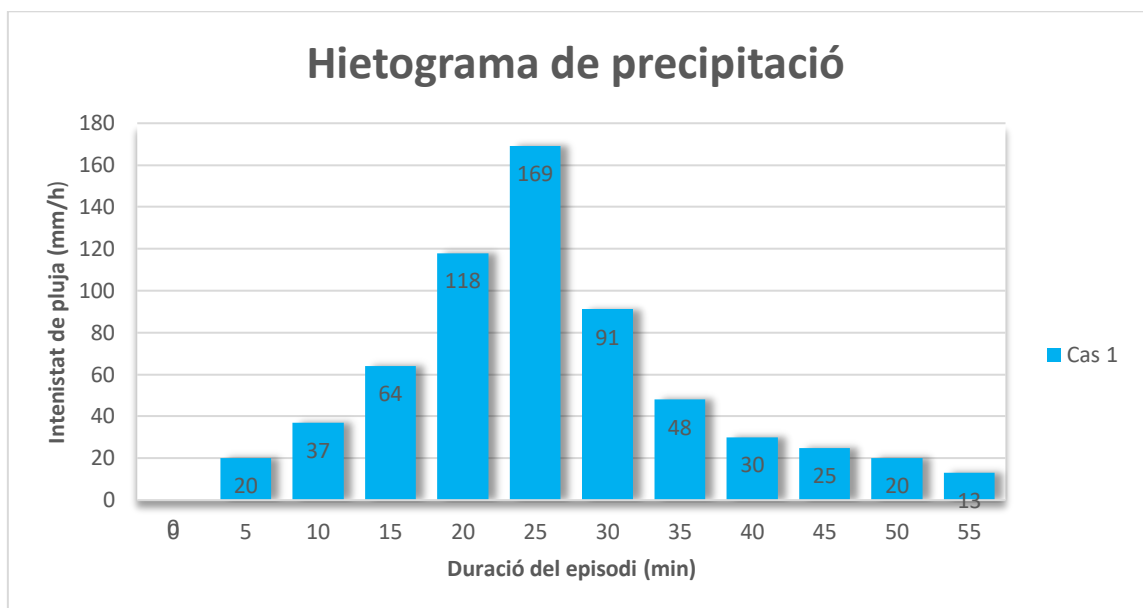


Figura 34. Hietograma d'intensitats de pluja de disseny, Plubarna 2010 IIA.

En aquest hietograma es pot apreciar que la intensitat de la pluja segueix una corba creixent fins al minut 25 i posteriorment decreix fins al final de l'esdeveniment als 55 minuts. Els intervals de temps seleccionats són de 5 minuts, ja que utilitzar períodes curts de temps, ajuda a aproximar de forma més precisa la pluja a la realitat, perquè és difícil que les intensitats de pluges es mantinguin constants en llargs períodes de temps. La pluja presenta les majors intensitats en els intervals compresos entre els minut 15 i el 30. A més a més, en l'interval de 15 minuts

transcorregut entre el minut 15 i el 30, el volum de pluja precipitada és superior a la suma de la precipitació obtinguda dels altres 8 intervals, és a dir, en 40 minuts.

Segons l'Agència Estatal de Meteorologia (AEMET), les intensitats (I) de pluja poden ser:

- Dèbils: intensitats de pluja inferiors als 2 mm/h
- Sense adjectivar: intensitats compreses entre 2-15 mm/h
- Fortes: intensitats compreses entre 15-30 mm/h
- Molt fortes: intensitats compreses entre 30-60 mm/h
- Torrencials: intensitats superiors a 60 mm/h

Per tant es pot dir, que de la totalitat de 11 intervals de 5 minuts, la pluja disposa de 4 intervals torrencials, 2 intervals d'intensitat molt forta, 4 d'intensitat forta i finalment un interval sense adjectivar.

6.2.2. Episodi de pluja del Cas 2

En el Cas 2, es pretén avaluar la xarxa de drenatge urbà existent segons una pluja característica en hipotètiques futures condicions de canvi climàtic, per a l'any 2050 . Per aquest motiu, per l'elecció de la pluja de disseny del cas 2, s'ha de cercar una pluja predictiva i aproximar-se al màxim al comportament que podria experimentar en un futur les pluges de Granollers. Aquesta, com en el cas 1, també serà donada en forma de hietograma d'intensitat de pluja.

Per al cas 2, s'ha escollit la utilització de la pluja de disseny proposada per el projecte CORFU. S'escull la pluja de disseny PLUBARNA 2050 A1B, en condicions de canvi climàtic en un escenari conservador. Aquesta pluja també tindrà una duració de 55 minuts i un període de retorn de 10 anys. En la següent figura es mostra el hietograma complet de la pluja seleccionada:

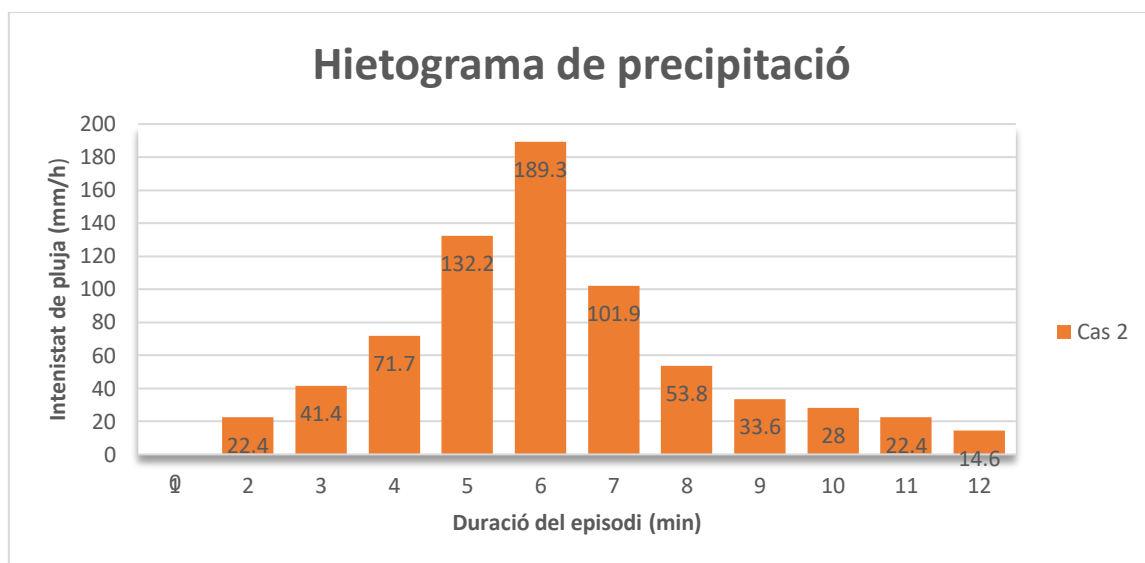


Figura 35. Hietograma d'intensitats de pluja de Plubarna 2050 A1B.

En aquest hietograma es pot apreciar que la intensitat de la pluja descriu la mateixa corba creixent fins al minut 25 i decreixent fins al final de l'esdeveniment, ja que manté una relació entre la PLUBARNA 2010 IIA, essent 1,12 vegades superior en tots els intervals.

La pluja presenta les intensitats més altes en els intervals del minut 15 fins al 30. En l'interval de 15 minuts transcorregut entre el minut 15 i el 30, el volum de pluja precipitada és superior a la suma de la precipitació obtinguda dels altres 8 intervals, és a dir, en 40 minuts.

Segons la nomenclatura proposada per AEMET, esmentada anteriorment, es pot determinar que de la totalitat dels 11 intervals de 5 minuts, la pluja disposa de 4 intervals torrencials, 3 intervals d'intensitat molt forta, 3 d'intensitat forta i finalment un interval sense adjectivar.

6.3. Resultats obtinguts de la simulació

En aquest apartat es desenvoluparà el cas d'estudi seleccionat, del qual, prèviament ja n'hem determinat les característiques i condicions de la zona, així com la seva xarxa de drenatge existent. Es descriuran i s'analitzaran els diferents resultats obtinguts a partir de la simulació realitzada mitjançant el software de càlcul hidrològic EPA SWMM 5.1. Aquesta simulació, permetrà obtenir una visió bastant detallada del funcionament de la xarxa de drenatge urbà de la ciutat de Granollers. També es posaran en valor les dades numèriques pel que fa al flux d'escorrentia, cabals circulants per la xarxa de col·lectors, número col·lectors que han entrat en càrrega, volum d'aigua alliberada a través dels pous de registre, entre d'altres.

A continuació, doncs, es mostrarà l'anàlisi detallat dels resultats obtinguts en cada un dels dos escenaris, i posteriorment es procedirà a realitzar un estudi comparatiu d'ambdós casos. Aquesta comparativa ens ajudarà a construir una idea de com poden evolucionar les necessitats de la xarxa de drenatge de Granollers, i veure en quins punts de la xarxa es poden experimentar problemàtiques.

Un cop determinats els punts conflictius de la xarxa de drenatge, s'intentarà donar una resposta i proposar mesures de mitigació, per d'aquesta manera intentar avançar-se als possibles problemes derivats dels canvis meteorològics en possibles condicions de canvi climàtic.

Cal destacar que en aquesta simulació s'ha considerat que els elements de captació d'aigües són suficients per captar la totalitat de l'aigua de les subconques. Aquest fet pot significar que els valors obtinguts en la inundació siguin inferiors als reals, ja que la inundació pot venir degut a

que la làmina d'aigua d'escorrentia és tant gran, que la eficiència dels embornals no és suficient per captar-la tota. En definitiva, en aquest treball només considera com a inundació la sortida a la superfície de l'aigua a través dels pous de registre, sense considerar que aquesta aigua torna a entrar a la xarxa de clavegueram.

6.3.1. Cas 1: Escenari Actual

El cas 1, és una aproximació del funcionament actual en el municipi de Granollers de la xarxa de drenatge urbà aplicant-hi un episodi de pluja, amb un període de retorn de 10 anys, és a dir, una pluja amb una alta intensitat. Com s'ha esmentat anteriorment es pren com a esdeveniment de pluja el hietograma Plubarna 2010 IIA, el qual s'introdueix en el software de càlcul SWMM com a sèrie temporal de pluja, tal i com es mostra en la següent figura.

Date (M/D/Y)	Time (H:M)	Value
30/04/2020	00:05	20
	00:10	37
	00:15	64
	00:20	118
	00:25	169
	00:30	91
	00:35	48
	00:40	30
	00:45	25
	00:50	20
	00:55	13

Figura 36. Sèrie temporal introduïda al software SWMM5 del Cas 1.

Un cop la sèrie temporal és aplicada en forma de pluja, es pot començar a avaluar l'estat de la xarxa a través de l'informe de resultats, els gràfics dels perfils longitudinals de la xarxa de col·lectors i el mapa interactiu de la conca d'estudi, el qual pot representar diferents elements de la xarxa en diferents instants de temps.

6.3.1.1. Resultats Obtinguts

Per tenir una visió global del sistema, cal esmentar les dades totals del sistema. En primer lloc el volum total d'aigua precipitada sobre l'àrea analitzada ha estat de $261,67 \times 10^6$ litres d'aigua. Aquesta aigua total, es pot separar en:

- Les pèrdues per evaporació sumen un total de $5,23 \times 10^6$ litres, essent un 2% del total.
- L'aigua infiltrada en el terreny representa un 46,75% de l'aigua precipitada, el que suposa la quantitat de $122,32 \times 10^6$ L.
- L'aigua que esdevé escorrentiu, que posteriorment serà captat per la xarxa de drenatge, representa el 50,33% del total, amb una quantitat de $131,69 \times 10^6$ L.

La simulació es duu a terme en el període de 12 hores transcorregut des de l'inici de l'esdeveniment de pluja. Un cop transcorregut aquest temps, encara queda en superfície un 1,63% de l'aigua precipitada que s'ha quedat estancada a la superfície. Cal esmentar que la simulació ha obtingut uns errors de continuïtat relativament petits, que suposen un -0,713%, i que permeten afirmar que el model ha pogut simular de manera satisfactòria.

Un cop descrites les dades relatives al esdeveniment de pluja, es pot procedir a analitzar el càlcul hidràulic, del flux d'aigua que ha transcorregut per l'interior de la xarxa de drenatge. Com s'ha quantificat anteriorment, l'aportació de l'escorrentia al flux que circula per la xarxa subterrània de drenatge urbà de Granollers, és de $131,69 \times 10^6$ L, que sumat a l'aportació d'aigua en temps sec ($10,42 \times 10^6$ L) resulta un total de $142,11 \times 10^6$ L. D'aquest total d'aigua que rep la xarxa, s'evacua correctament en sortides un 83,98% de l'aigua, però s'obté que un 13,01% no ho fa. Això significa que $18,50 \times 10^6$ L d'aigua que haurien d'haver sigut conduïts a la sortida, tornen a sortir a la superfície a través del pous de registre, i d'aquesta forma acaben produint inundacions als carrers de la ciutat de Granollers.

Si intentem posar de manifest els punts més conflictius i de la xarxa, els hem de buscar a través del Mapa del Projecte en el Software SWMM v.5.1 . Els indicadors que permeten determinar aquests punts problemàtics pel que fa a inundacions, són els mapes que representen quines són les línies de col·lectors més carregades (link capacity), i també els que representen la inundació dels pous de registre (flooding node). A través d'aquestes representacions s'intentarà determinar les deficiències del sistema de drenatge.

A continuació es mostra el mapa del software 5.1., on es representa l'estat de la xarxa de col·lectors, segons la capacitat de la xarxa:

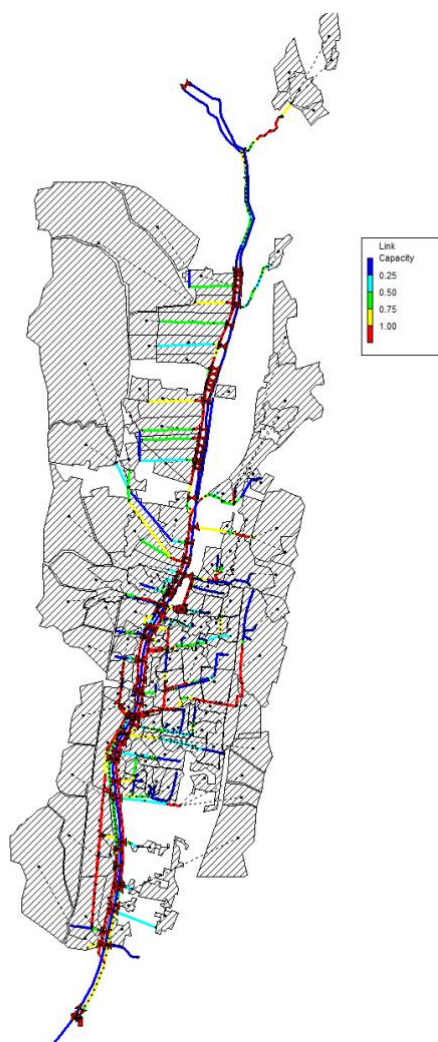


Figura 37. Representació de la càrrega als col·lectors al minut 0:35 del procés de pluja.

En la *figura 37* es pot apreciar que un gran nombre de col·lectors ha entrat en càrrega. Els col·lectors que han entrat en càrrega, és a dir que el 100% de la capacitat del conducte està sent utilitzat per l'aigua circulant, estan representats en vermell en l'escala cromàtica, mentre que els tons més verdosos y blaus determinen aquells en que la totalitat del conducte no està sent utilitzada. Concretament en tot el procés de pluja són 390 els col·lectors que entren en càrrega en, com a mínim, un interval de 5 minuts. Tot i això, en total són 537 els que en algun instant durant el transcurs del procés de pluja han entrat en càrrega. Temporalment, s'aprecia que el moment que es concentra la major quantitat de col·lectors en càrrega és situa entre els minuts 30 i 35 després de l'inici del procés de pluja. Es pot veure que a partir del minut 20, comencen a aparèixer els primers col·lectors en càrrega, i aquests no desapareixen per complet fins 1:50 h després de l'inici de la pluja.

Es pot apreciar com al llarg del temps els col·lectors de cotes més altes són els primers de deixar d'estar en càrrega. En canvi els col·lectors d'aigües avall, perllonguen en el temps el seu estat de

càrrega. Aquest fet té sentit, ja que l'aigua transita aigües avall, i es va acumulant en aquella zona.

Si es vol concretar les àrees en les quals es situen els casos més problemàtics de la xarxa, és fàcil veure que són en tres les zones on es concentren més col·lectors en càrrega. A les lleres dreta i esquerra del Riu Congost, on es troben el Passeig Fluvial i el Passeig de la Conca de Besòs juntament amb la seva continuació el Passeig de la Ribera, es pot apreciar que en aquests trams gairebé en la totalitat dels col·lectors estan al 100% de capacitat. També es poden observar gran nombre de col·lectors en càrrega a la zona del casc antic del municipi. Alguns dels carrers més col·lapsades són per exemple Carrer Camp de les Moreres, Carrer Prat de la Riba, Carrer Indústria, Carrer Josep Torras i Bages així com el perpendicular a aquest, el carrer de Ponent. D'altra banda a la llera esquerra del riu Congost, a la zona del Polígon Industrial, el Carrer de Jordi Camp i l'Avinguda de Sant Julià.

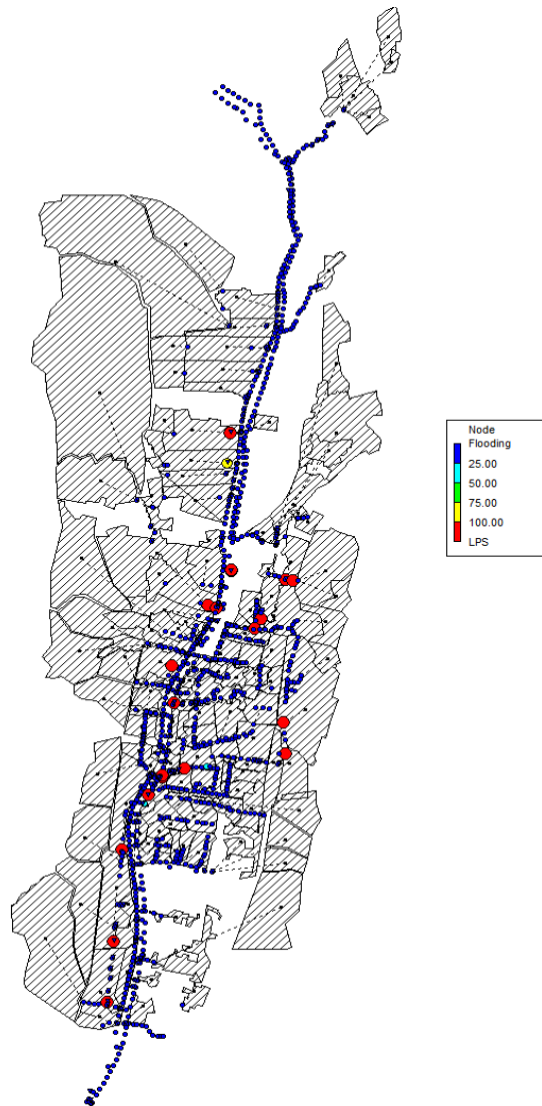


Figura 38. Representació de la inundació als nodes al minut 0:30 del procés de pluja.

En la *figura 38*, es pot apreciar les inundacions produïdes als nodes, en un instant de temps determinat segons els litres/segon expulsats a la superfície, categoritzats en escala cromàtica. Es pot observar que aquells punts amb major inundabilitat dels nodes coincideixen, com era d'esperar, amb els col·lectors que han entrat en càrrega, el Passeig Fluvial i Passeig de la Conca de Besòs en diversos i alguns dels carrers del casc antic com el Carrer Camp de les Moreres, Carrer Prat de la Riba, Carrer Josep Torras i Bages així com el perpendicular a aquest, el carrer de Ponent. A la zona del Polígon Industrial l'avinguda de Sant Julià. L'instant en el qual es produeix el major nombre de nodes inundats, té lloc en l'interval de temps transcorregut entre el minut 30 i 35 després de l'inici del procés de pluja.

Al minut 35 després de l'inici de l'esdeveniment de pluja es determina el punt més conflictiu, concretament al Carrer Camp de les Moreres. En la seva totalitat existeixen fins a 3 nodes que expulsen gran quantitat d'aigua a la superfície. En els trencalls amb Passeig fluvial, en trobem dos d'ells, posteriorment amb el carrer Lluís Companys.

Troblem punts inundats al barri del Lledoner, concretament al carrer Juli Garetà, en les interseccions amb Carrer de Girona i Carrer Primer Marquès Franqueses, així com el final d'aquesta mateixa línia de col·lectors trobem un punt amb alta inundabilitat al parc del Lledoner. Al Camí de Ramón Llull (C-251) amb el carrer Corró, així com un punt a davant de la Parròquia Mare de Déu de Montserrat i Sant Antoni de Pàdua. A les rodalies del Jutjats de Granollers hi trobem dos punts amb alta inundabilitat, situats al Passeig de la Muntanya, i al mateix aparcament dels jutjats.

A la llera esquerra del riu Congost, trobem dos zones més amb alta inundabilitat. La primera, situada a l'aparcament públic del Carrer Mataró (darrera el supermercat Mercadona). En segon lloc trobem un dels punts que evacua més aigua, es situa al Carrer Parets en la intersecció amb el Passeig de la Ribera, i en aquesta mateixa línia de col·lectors al carrer Parets amb el Carrer Riera.

S'ha pogut comprovar que aquesta zona ja ha estat afectada per inundacions amb anterioritat. El 7 de Setembre de 2018, es va produir una forta tempesta que va deixar 83 l/m², en pocs minuts i que va inundar diferents carrers. Carrers com Lluís Companys, Camp de les Moreres, la Zona esportiva del Club Natació Granollers i la fàbrica de les Arts Roca Umbert, en van ser els punts més afectats.



Figura 39. Carrer Lluís Companys de Granollers, inundat per la tempesta divendres 07/09/2018 (Font: NacióDigital. Foto: @elisendacat).

6.3.2. Cas 2: Escenari futur en condicions de canvi climàtic (2050)

El cas 2, és una aproximació del funcionament futur de la xarxa de drenatge urbà del municipi de Granollers, considerant una sèrie de premisses. En primer lloc, que no s'ha dut a terme cap actuació i la xarxa de drenatge segueix essent exactament igual a la actual. En segon lloc es té en compte que és un esdeveniment futur, i per això s'ha hagut de fer una aproximació de la possible climatologia futura, tenint en compte les possibles conseqüències i afectacions que pot causar el canvi climàtic. Per aquest motiu s'ha utilitzat una episodi de pluja futur, amb un període de retorn de 10 anys. Com s'ha esmentat amb anterioritat, la pluja escollida per realitzar aquesta simulació és la Plubarna 2050 A1B, la qual considera condicions de canvi climàtic en un escenari conservador. El hietograma d'aquesta pluja és introduïda al Software de càlcul SWMM com a sèrie temporal de pluja, tal i com es mostra la següent figura:

Time Series Editor		
Time Series Name		
CAS2_2050		
Description		
CAS 2: PLUBARNA 2050 A1B		
<input type="checkbox"/> Use external data file named below		
<input checked="" type="checkbox"/> Enter time series data in the table below		
No dates means times are relative to start of simulation.		
Date (M/D/Y)	Time (H:M)	Value
30/04/2020	00:05	22.4
	00:10	41.4
	00:15	71.7
	00:20	132.2
	00:25	189.3
	00:30	101.9
	00:35	53.8
	00:40	33.6
	00:45	28.0
	00:50	22.4
	00:55	14.6

Figura 40. Sèrie temporal introduïda al software SWMM del Cas 2.

Un cop la segona sèrie temporal és aplicada en forma de pluja, es procedeix a avaluar l'estat de la xarxa a través de l'informe de resultats, els gràfics dels perfils longitudinals de la xarxa de col·lectors i el mapa de la conca d'estudi, que pot representar diferents escenaris en diferents espais de temps.

6.3.2.1. Resultats obtinguts

El volum total de pluja precipitat sobre la l'àrea analitzada en les diferents subconques ha estat de $293,11 \times 10^6$ litres d'aigua. Les pèrdues per evaporació sumen un total de $5,26 \times 10^6$ litres, essent un 1,79% del total, mentre que l'aigua infiltrada en el terreny representa un 45,64% de l'aigua precipitada, el que suposa la quantitat de $133,80 \times 10^6$ L. Finalment l'aigua que esdevé esorrentiu, que posteriorment serà captat per la xarxa de drenatge, representa el 51,80% del total, amb una quantitat de $151,81 \times 10^6$ L.

La simulació es duu a terme en un període de 12 hores, transcorregut des de l'inici de l'esdeveniment de pluja. Un cop transcorregut aquest període de 12 hores, encara queda en superfície un 1,46% de l'aigua precipitada que s'ha quedat estancada en superfície. Cal esmentar que la simulació ha obtingut uns errors de continuïtat relativament petits, que suposen un 0,701%, i que permeten afirmar que el model ha pogut simular de manera satisfactòria.

Un cop descrites les dades relatives al esdeveniment de pluja, es pot procedir a analitzar el càlcul hidràulic, del flux d'aigua que ha transcorregut per l'interior de la xarxa de drenatge. Com s'ha comentat anteriorment l'aportació de l'esorrentia al flux circulant per la xarxa subterrània de drenatge urbà de Granollers, es quantifica amb $151,81 \times 10^6$ L, que juntament sumat a l'aportació en temps sec ($10,42 \times 10^6$ L) resulta un total de $162,23 \times 10^6$ L. La xarxa evacua correctament en sortides un 82,70% de l'aigua, però s'obté que un 14,48%, és a dir, $23,50 \times 10^6$ L de l'aigua que hauria d'haver sigut conduïda a la sortida, torna a sortir a la superfície a través de pous de registre, i produint inundacions als carrers de Granollers. Pel que fa a l'aigua restant, es produeixen unes pèrdues per evaporació que suposen el 0,06%, i al cap de les 12 hores de simulació, encara es troba dipositada en els conductes un 1,99%. Existeixen errors de continuïtat del 0,75%.

Si intentem posar de manifest els punts més conflictius i problemàtics, hem de buscar a través del Mapa del Projecte en el Software SWMM v.5.1. quines són les línies de col·lectors més

carregades, així com quins pous de registre són els que expulsen major aigua. A través de la següents imatges s'intentarà determinar les deficiències del sistema de drenatge:

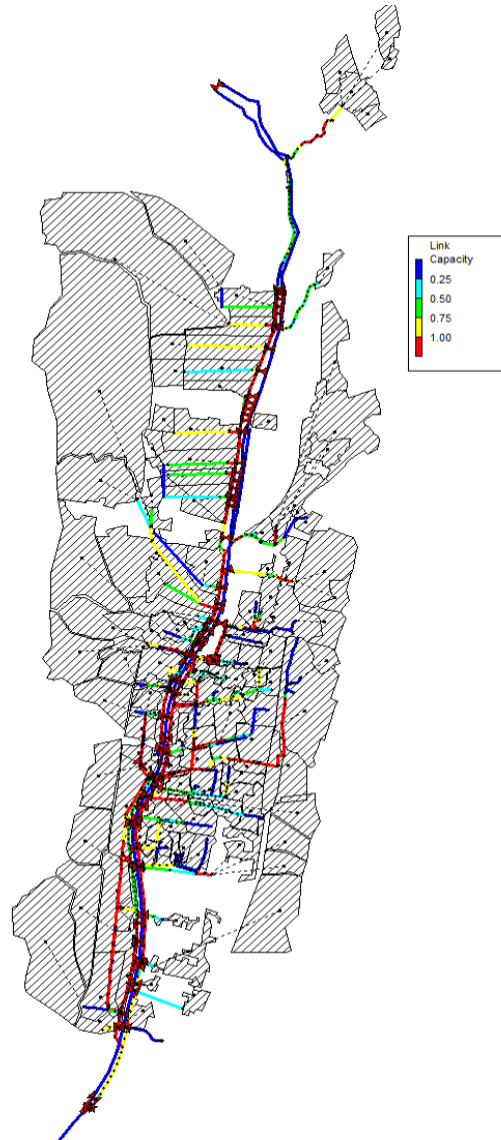


Figura 41. Representació de la càrrega als col·lectors al minut 0:35 del procés de pluja.

A la *figura 41*, es pot apreciar que un gran nombre de col·lectors ha entrat en càrrega, aquests estan representats en escala cromàtica, de color vermell. Concretament en tot l'esdeveniment de pluja són 414 els col·lectors que entren en càrrega en, com a mínim, un interval de 5 minuts. Tot i això, són 569 els que en algun instant durant el transcurs del procés de pluja han entrat en càrrega. Temporalment, s'aprecia que el moment que es concentra la major quantitat de col·lectors en càrrega és situa entre els minuts 30 i 35 després de l'inici del procés de pluja. És a partir del minut 20, quan comencen a aparèixer els primers col·lectors en càrrega, i no deixen d'estar en càrrega per complet fins 1:50 h després de l'inici de la pluja.

L'evolució del procés de drenatge és exactament igual que el que s'ha vist anteriorment al cas 1, en la qual els col·lectors en cotes més altes són els primers que entren en càrrega, posteriorment entren en càrrega els col·lectors situats aigües avall. Succeeix també el mateix en el procés de descàrrega, on els col·lectors situats a cotes més altes deixen d'estar en càrrega, mentre que aquells situats aigües a baix es mantenen més temps en estat de càrrega.

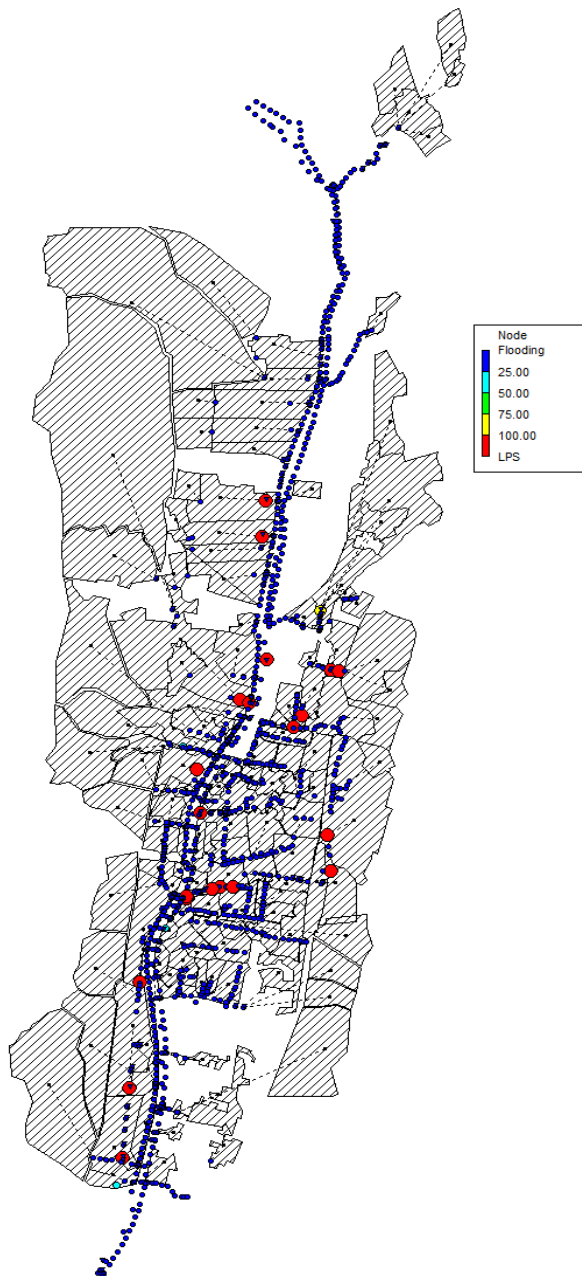


Figura 42. Representació de la inundació als nodes al minut 0:30 del procés de pluja.

A la figura 42, es pot apreciar les inundacions produïdes als nodes en la segona simulació, al minut 30, segons els litres/segon expulsats a la superfície, categoritzats en escala cromàtica. Els punts conflictius detectats en aquesta simulació, són tots aquells esmentats en el cas 1, sumats a nous punts problemàtics que sorgeixen derivats de l'augment en el volum d'aigua. Sorgeixen

nous punts amb alta inundabilitat al Carrer camp de les moreres concretament en les interseccions amb i Carrer de la mare de Déu de Montserrat en trobem dos més, i finalment amb el Carrer del Vallès. Distribuïts en els 600 metres lineals d'aquest carrer es concentra un total de 5 punts d'alta inundabilitat, cosa que genera un gran flux de sortida.

Trobem també un punt d'inundació al Carrer de la Ferreria que limita amb el municipi de Corró d'Avall. Cal recordar que part de la xarxa de drenatge urbà del municipi de Corró d'Avall es connecta a la de Granollers.

6.4. Anàlisi comparatiu dels casos 1 i 2

En aquest capítol es pretén realitzar un anàlisi comparatiu de les dos casuístiques simulades, el cas 1 i cas 2, és a dir, les pluges de 2020 i de 2050 respectivament, per d'aquesta manera posar de manifest els canvis que pot provocar la situació de canvi climàtic en la xarxa de drenatge urbà de la ciutat de Granollers. D'aquesta manera es podrà donar una resposta a la segona pregunta plantejada a l'inici del cas d'estudi (veure *pàgina 44*).

6.4.1. Pluviometria i escorrentia

A continuació es presenten els valors referents a la pluviometria obtinguda a la conca de Granollers, en les diferents casuístiques:

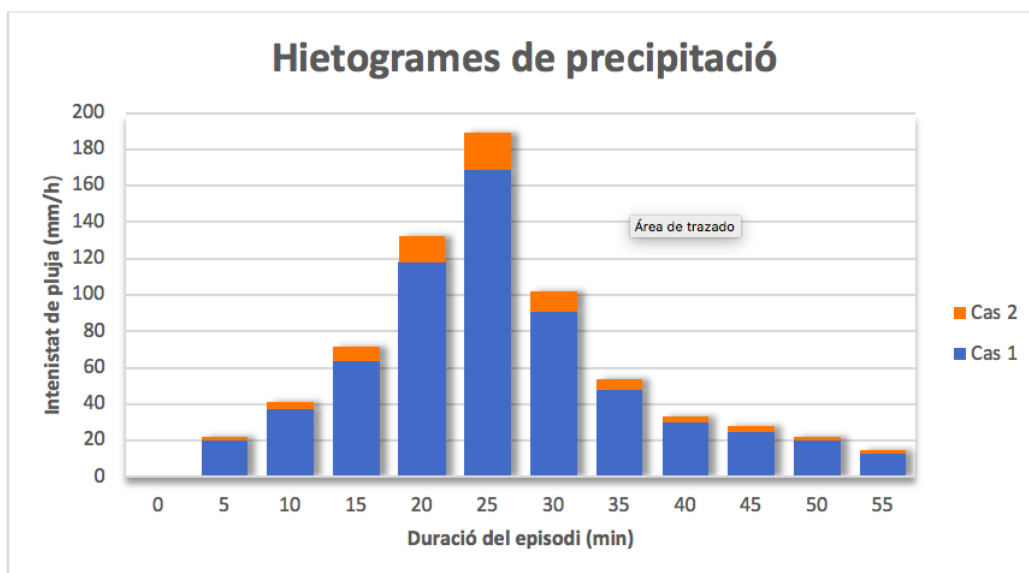


Figura 43. Gràfic comparatiu dels hietogrames de precipitació en ambdós casos de simulació.

En aquest gràfic, es compara els dos hidrogrames referents als dos esdeveniments de pluja utilitzats en la simulació realitzada amb EPA SWMM v.5.1. Es pot apreciar que l'esdeveniment del cas 2, el Plubarna 2050 A1B, aporta un major volum d'aigua en tots els intervals de temps.

Aquest augment és concretament del 12% en les intensitats de cadascun dels 12 intervals que es distribueixen en tota la duració del episodi plujós.

Per entendre millor com aquesta aigua es distribueix sobre el territori, particularment sobre les diferents subconques, cal estudiar la transformació pluja-escorrentia que es deriva del episodi de pluja.

Transformació pluja- escorrentia	Precipitació total	Pèrdues per evaporació	Pèrdues per infiltració	Escorrentia	Emmagatzematge en xarxa
	Volum (10 ⁶ litres)	Volum (10 ⁶ litres)	Volum (10 ⁶ litres)	Volum (10 ⁶ litres)	Volum (10 ⁶ litres)
Cas 1 (2020)	261,67	5,23	122,32	131,69	4,29
Cas 2 (2050)	293,11	5,26	133,80	151,81	4,29

Taula 2. Valors obtinguts del procés de transformació pluja-escorrentia en ambdós casos de simulació.

En la *taula 2* es pot veure que l'augment del 12% en la intensitat de l'episodi de pluges, a part d'eleva el volum de precipitació, també significa un augment notable en la infiltració i en l'escorrentia. Més detalladament es pot apreciar aquest augment en la següent taula, on es pot veure l'augment de volums expressats en %.

	Precipitació total (%)	Pèrdues per evaporació (%)	Pèrdues per infiltració (%)	Escorrentia (%)	Emmagatzematge en xarxa (%)
Cas 2 vs. Cas 1	12,02	0,57	9,39	15,28	0,00

Taula 3. Augment dels volums obtinguts del cas 2 respecte al cas 1 del procés de transformació pluja-escorrentia.

Es pot apreciar que amb un augment del 12,02% del volum total obtingut del esdeveniment de pluja 2050, respecte la del 2020, les pèrdues per evaporació, no experimenten pràcticament cap canvi respecte la pluja 2020. Aquest fet, es repeteix pel que fa a l'emmagatzematge final que queda a la xarxa. D'altra banda les pèrdues per infiltració en el terreny pateixen un augment del 9,39%, i per tant no assoleixen mantenir la relació del augment del 12%. Finalment l'escorrentia del cas 2 augmenta un 15,28% respecte la generada pel cas 1. Tenint en compte que aquest augment és major que el propi del esdeveniment de pluja, es pot extreure que com més intens sigui un esdeveniment de pluja major serà la proporció d'aigua pluvial que es convertirà en escorrentia.

6.4.2. Xarxa de col·lectors

La xarxa de col·lectors és l'element principal del drenatge urbà a les ciutats, per tant és important analitzar el funcionament d'aquests col·lectors. D'aquesta manera es podrà determinar si es compleixen les necessitats pel que fa al transport de les aigües pluvials en un episodi d'alta intensitat de pluja.

La xarxa de col·lectors de Granollers, com s'ha esmentat anteriorment disposa 135 km lineals de canalitzacions. En la simulació realitzada mitjançant SWMM només s'han considerat aquelles conductes majors de 800mm de diàmetre, el que vindrien a ser les artèries principals, reduint-la així fins a 72,77 km lineals.

En ambdós casos, les simulacions han posat de manifest deficiències pel que fa a la xarxa de col·lectors, on s'ha comprovat que gran part de la xarxa de col·lectors està sobrecarregada durant diversos intervals de temps. Aquest fet significa que la xarxa no està acondicionada per transportar tal quantitat d'aigua, i degut a que la pressió atmosfèrica resulta inferior a la interior del conducte, aquesta tendeix a ser evacuada a la superfície per els pous de registre o embornals. A la següent taula podem veure les dades referents a la sobrecàrrega dels col·lectors.

	Nº col·lectors en càrrega	Metres lineals de col·lectors en càrrega	Hores amb capacitat limitada de la xarxa
Cas 1 (2020)	537	31448,9	127,63
Cas 2 (2050)	569	33016,3	140,76
Diferència	32	1567,4	13,13
Augment (%)	5,95%	4,98%	10,28%

Taula 4. Resum dels resultats obtinguts en la xarxa de col·lectors i comparativa.

En la taula s'evidencia que l'augment d'intensitat del 12% en l'episodi de pluja agreuja encara més els problemes a la xarxa de col·lectors. Del total de 1185 col·lectors considerats en la simulació, en el cas 1 entren en càrrega 537, és a dir el 45,31% de la xarxa. Per altra banda al cas 2 entren en càrrega 569, és a dir el 48,01% del total, el que significa que hi ha hagut un augment relatiu del 5,95%. Aquest augment de 32 nous col·lectors significa que 1567,4 metres lineals de xarxa que no havien entrat en càrrega en el cas 1, ho facin en el cas 2. D'aquesta manera sumats als 31448,9 metres de xarxa col·lapsats en el cas 1, s'assoleixen la xifra de 33016,3 metres, que

en relació amb la totalitat de xarxa considerada en la simulació (72,77 km) significa que el 45,37% de la xarxa entra en càrrega en algun moment de la simulació del cas 2.

Si parem atenció al temps que dura aquest estat de càrrega en la xarxa de col·lectors, també s'aprecia un important augment en el cas 2. S'observa com el cas 2, experimenta un augment relatiu del 10,28% pel que fa a la suma total d'hores que la xarxa ha estat en càrrega.

6.4.3. Inundabilitat

En aquest punt s'exposaran les dades referents a la inundació provocada per la sortida d'aigües des de la xarxa de sanejament cap a la superfície de la ciutat dels dos episodis de pluja simulats, el cas 1, amb la pluja actual de 2020, i el cas 2 amb la hipotètica pluja en condicions de canvi climàtic del 2050. Són dades que tenen gran importància ja que són un bon indicador de si la xarxa funciona correctament i està capacitada per evacuar la totalitat les aigües de forma eficient o per el contrari, no ho està i es generen inundacions. Mitjançant aquestes dades es podrà donar resposta a la segona qüestió, en la qual s'exposava si la xarxa de Granollers estava suficientment capacitada per suportar pluges en condicions de canvi climàtic.

A continuació es presenta una taula que recull les dades significatives referents als 25 pous de registre més inundats. En aquesta taula es pot apreciar la comparativa dels ràtios del cabals (lps), les hores d'inundació, i els volums totals, en ambdós simulacions així com l'augment experimentat en el cas 2 provocat per l'increment de la intensitat de pluja derivada de les condicions de canvi climàtic., expressat en percentatge.

NODE	Classificació dels nodes amb major inundació		Ràtio del cabal de sortida (lps)			Hores inundat (hores)			Volum total d'aigua expulsada (litres x10 ⁶)		
	Cas 1	Cas 2	Cas 1	Cas 2	Augment	Cas 1	Cas 2	Augment	Cas 1	Cas 2	Augment
6186	1	1	3454,77	3793,58	9,80%	0,6	0,63	5,00%	3,457	4,232	22,40%
2581	2	2	2584,75	2588,82	0,20%	0,34	0,39	14,70%	2,291	2,726	19,00%
A761	3	3	743,06	743,4	0,00%	0,74	0,79	6,80%	1,594	1,739	9,10%
A_571	4	5	2809,77	2815,47	0,20%	0,3	0,35	16,70%	1,216	1,64	34,90%
GR1_45H	5	17	4906,86	4913,43	0,10%	0,13	0,03	-76,90%	1,213	0,279	-77,00%
A523	6	7	523,99	523,96	0,00%	0,71	0,76	7,00%	1,124	1,227	9,20%
806	7	8	1429	1447,05	1,30%	0,25	0,28	12,00%	1,054	1,219	15,70%
271	8	6	3013,49	3926,01	30,30%	0,16	0,2	25,00%	0,967	1,485	53,60%
477	9	4	2746,57	4287,57	56,10%	0,17	0,22	29,40%	0,937	1,734	85,10%
PF_0267	10	9	1862,19	2492,84	33,90%	0,21	0,25	19,00%	0,754	1,142	51,50%
341	11	10	901,72	1124,21	24,70%	0,29	0,34	17,20%	0,656	0,893	36,10%
GR1_85B	12	13	899,96	903,38	0,40%	0,25	0,28	12,00%	0,554	0,677	22,20%
GR1_85C	13	14	671,44	718,32	7,00%	0,28	0,32	14,30%	0,532	0,635	19,40%
2399	14	12	1370,9	1698,28	23,90%	0,2	0,23	15,00%	0,523	0,735	40,50%
FR_18	15	11	1781,14	2492,38	39,90%	0,15	0,19	26,70%	0,484	0,843	74,20%
A696	16	15	1323,58	1809,38	36,70%	0,14	0,17	21,40%	0,352	0,587	66,80%
50	17	16	507,28	611,6	20,60%	0,26	0,32	23,10%	0,242	0,328	35,50%
PF_06	18	18	550,14	738,16	34,20%	0,16	0,2	25,00%	0,16	0,26	62,50%
4020	19	19	574,44	806,2	40,30%	0,14	0,17	21,40%	0,104	0,213	104,80%
A_400	20	20	515,1	875,88	70,00%	0,07	0,12	71,40%	0,074	0,2	170,30%
VORTEX	21	21	90,58	135,58	49,70%	0,52	0,58	11,50%	0,066	0,166	151,50%
GR1_45G	22	24	5018,52	5555,07	10,70%	0,01	0,01	0,00%	0,045	0,047	4,40%
A_570	23	22	525,92	1073,61	104,10%	0,03	0,08	166,70%	0,014	0,155	1007,10%
GR1_155	24	27	23,44	26,46	12,90%	0,31	0,47	51,60%	0,011	0,023	109,10%
A_676	25	31	1647,01	1779,88	8,10%	0,01	0,01	0,00%	0,01	0,011	10,00%
TOTAL =									18,434	23,196	25,80%

Taula 5. Resultats d'inundació dels 25 nodes amb més volum inundat, en els dos casos de simulació.

A la taula 5 es mostren els 25 nodes que expulsen, en el cas 1, més volum d'aigua, i es comparen amb els resultats obtinguts del cas 2. Tal com es pot veure a la taula, en la totalitat dels nodes, a excepció d'un, es produeix un augment significatiu tant del cabal d'expulsió com de les hores d'inundació, el que comporta un augment del volum d'aigua expulsat per la xarxa de col·lectors cap a la superfície. Es demostra doncs que

Els resultats globals de les inundacions en els pous de registre es recullen en la següent taula:

	Nº de pous inundats	Volum d'inundació (litres x10 ⁶)
Cas 1 (2020)	154	18,500
Cas 2 (2050)	171	23,500

Taula 6. Resultats totals de la inundació als pous de registre.

En la taula anterior es pot veure que entre el cas 1 i el cas 2, sorgeixen 17 nous punts inundats en tota la ciutat de Granollers. Tot i això el més preocupant és que amb només un increment del 12% de la intensitat de pluja, el volum d'escorrentia creix un 15,28%, però el volum d'aigua que sobresurt de la xarxa pateix un augment del 27,02%. Això significa un gran volum d'aigua, i posa de manifest un considerable augment dels problemes d'inundació de Granollers relatius a un increment en les intensitats de pluja.

6.4.3. Qualitat de l'aigua

La simulació amb el software de càlcul SWMM v.5.1, també permet extreure dades relacionades a la qualitat de l'aigua, tot i que en termes de qualitat d'aigua té forces limitacions, en comparació amb altres softwares de pagament. Proporciona dades de diferents contaminants situats a la superfície, que degut a l'arrossegament produït per l'escorrentia, arriben a la xarxa de drenatge subterrani. Permet, doncs, realitzar estudis de seguiment dels contaminants que poden ser recollits per la xarxa i conduïts a estacions de tractament, o bé que són retornats al medi directament sense tractar.

En aquest treball s'han considerat 3 indicadors d'elements contaminants amb les següents premisses:

- Sòlids totals en suspensió (TSS): és la quantitat de sòlids no filtrables en l'aigua.
- Demanda química d'oxigen (DQO): és una mesura aproximada de la demanda teòrica d'oxigen, és a dir, l'oxigen necessari per oxidar la totalitat dels constituents orgànics en inorgànics.

- Amoni (NH_4): Com a resultat del metabolisme dels animals i altres compostos orgànics, els ions d'amoni són expulsats al medi i són tòxics en altes concentracions.

Per poder entendre i analitzar els resultats obtinguts en aquest treball, que es mostraran a continuació, cal tenir present una sèrie de consideracions que s'han pres per tal de realitzar la simulació.

En el cas dels SS, es defineix una concentració en aigua pluvial de 7 mg/l i de 182 mg/l en aigües residuals en clima sec. La DQO només prové de les aigües residuals en clima sec, en una concentració de 240mg/l, i representa el 84,5% de la concentració de SS. Finalment, pel que fa al NH_4 , es suposa una concentració de 0,55 mg/l en l'aigua pluvial, i 38mg/l en les aigües residuals en clima sec. El NH_4 , representa el 1,3% del total de la concentració de SS. Per determinar la quantitat de contaminants en superfície s'ha suposat que, en ambdós casos de simulació, l'última pluja que va eliminar les partícules contaminants de la superfície de la ciutat es va produir 14 dies abans. De tal manera que el període sec abans de la pluja simulada és de 13 dies.

A continuació es mostren en dues taules els resultats obtinguts en els dos casos de simulació, pel que fa al nivell de qualitat de l'aigua, segons els tres indicadors de contaminació estudiats expressats kilograms:

			SS	DQO	NH_4
CAS 1 (2020)	Entrada	Aportació en Temps sec	3647,57	5106,6	521,08
		Aportació per la pluja	5337,77	3731,59	129,82
	Sortida	Sortida del sistema	5980,00	6203,98	545,92
		Pèrdues per inundació	330,365	181,046	15,273
		Emmagatzemat a la xarxa	470,99	604,48	58,01

Taula 7. Valors de la qualitat del l'aigua obtinguts en la primera simulació (kg).

			SS	DQO	NH4
CAS 2 (2050)	Entrada	Aportació en Temps sec	3647,57	5106,60	521,08
		Aportació per la pluja	5517,36	3764,35	141,39
	Sortida	Sortida del sistema	6121,99	6232,47	554,63
		Pèrdues per inundació	386,25	200,54	18,66
		Emmagatzemat a la xarxa	450,97	586,39	57,29

Taula 8. Valors de la qualitat de l'aigua obtinguts en la segona simulació (kg).

A la *taula 7 i 8*, es poden apreciar les diferències obtingudes pel que fa a la qualitat de l'aigua, segons si són relatius al flux d'entrada a la xarxa o bé al de la sortida.

En l'entrada d'aigües a la xarxa, l'aportació en temps sec, com és evident, és el mateix en els dos casos de la simulació, ja que no depèn de l'esdeveniment de pluja. Per altra banda, es pot apreciar un augment en SS i NH₄ del 3,36% i del 8,91% respectivament. En canvi la DQO, no experimenta un gran augment, només del 0,87%, ja que com hem esmentat amb anterioritat, depèn en major grau de l'aportació seca.

D'altra banda, si ens fixem en la sortida de contaminants de la xarxa, es pot apreciar que es produeix un augment significatiu en les pèrdues per inundació. Aquest fet concorda amb els resultats mostrats anteriorment, en els quals s'obtenia que el volum d'aigua expulsat per la xarxa en el Cas 2 era un 27% superior al del Cas 1. Pel que fa a la qualitat de l'aigua d'aquestes pèrdues per inundació, s'aprecia que augmenta un 16,92% pel que fa als SS, un 10,77% en DQO, i un 22,28% en NH₄. Finalment la quantitat de massa de contaminants, emmagatzemats al final de la simulació del Cas 2, és l'únic procés que experimenta un decreixement respecte al del Cas 1. Tot i això en cap dels tres elements supera un decreixement del 5%.

El software de càlcul SWMM v5.1, també permet recopilar dades referents a les concentracions de contaminants, en cada un dels elements d'estudi, per cada un dels intervals de simulació. A partir d'aquestes dades es poden realitzar els polutogrames relatius a cada contaminant.

Per tal de poder representar els canvis obtinguts en les dues zones diferents, aplicant els dos episodis de pluja simulats, i exemplificar els resultats obtinguts de l'estudi de qualitat d'aigua, s'han pres dos *Outfalls* de referència. Aquests dos punts han estat triats amb criteri, ja que són representatius i exemplifiquen el comportament dels abocaments que es produeixen a la ciutat. Es situen en dues zones diferents de la ciutat. Un al centre de la ciutat, l'OUT_57L1, que és un *Outfall* que aboca aigua directament al Riu Congost, a l'alçada del Carrer Arenys. L'altre punt és el SOBREIXIDOR_03, es situa al final del terme municipal i és l'últim *Outfall* al Riu Congost, abans de conduir les aigües a l'estació EDAR.

A continuació es mostren els tres Polutogrames obtinguts pels diferents contaminants considerats en la simulació de l'esdeveniment de pluja:

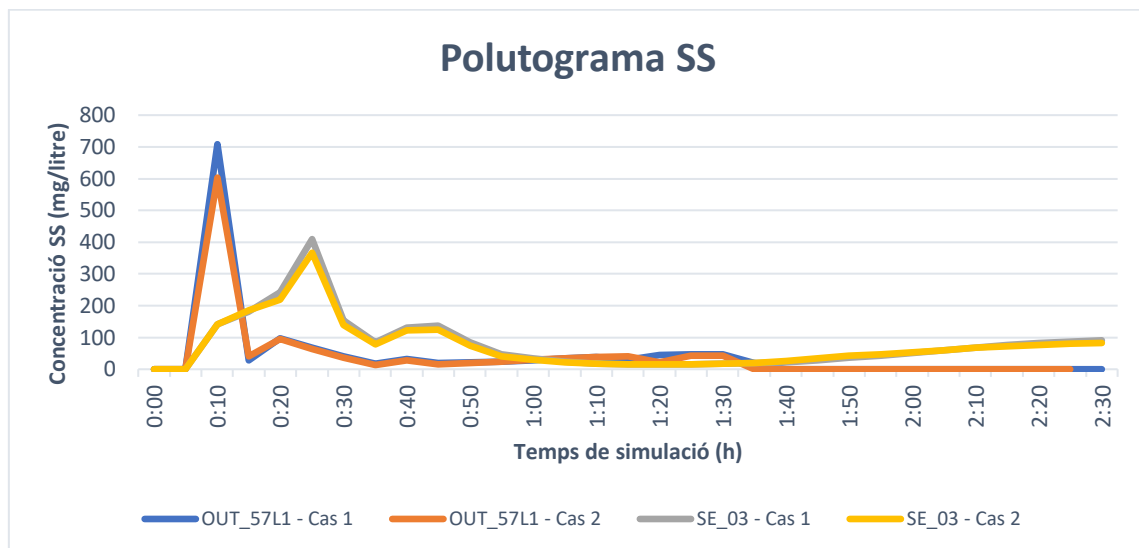


Figura 44. Polutograma de SS dels Outfalls en els dos Casos d'estudi.

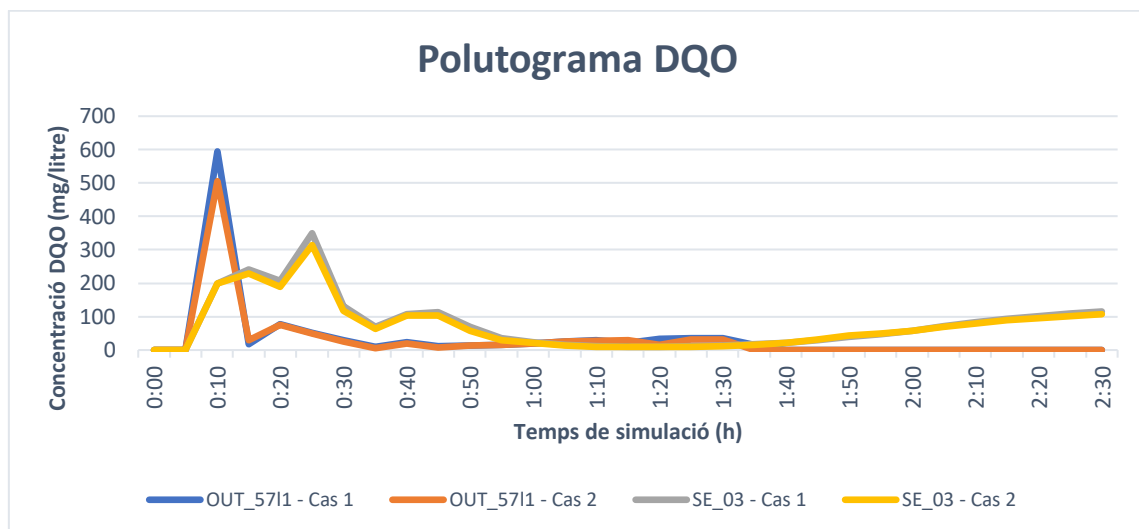


Figura 45. Polutograma de DQO dels Outfalls en els dos Casos d'estudi.

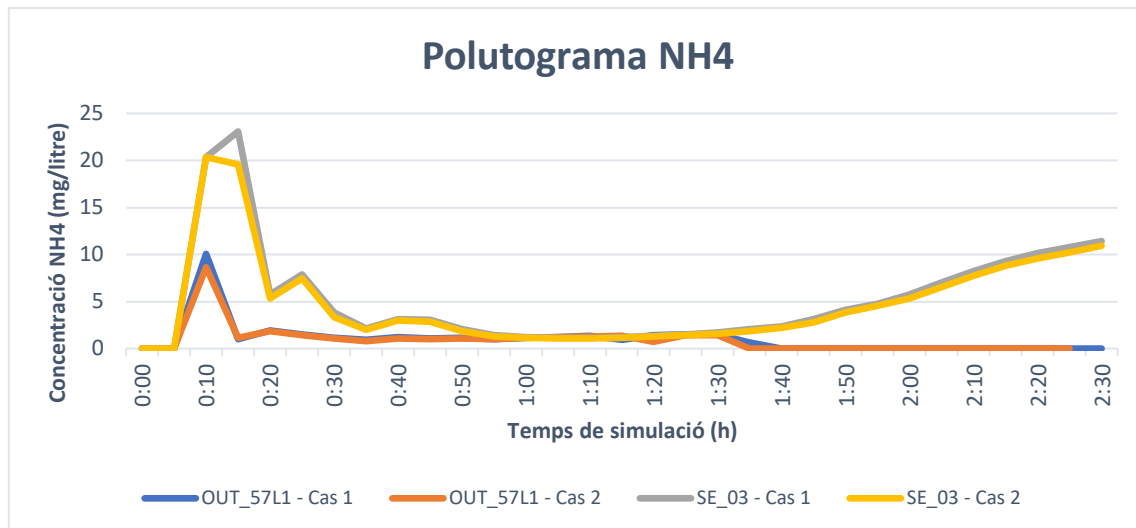


Figura 46. Polutograma de NH4 dels Outfalls en els dos casos d'estudi.

Com es pot apreciar, els tres polutogrames segueixen una tendència comú, sobretot en el cas de SS i DQO, que tenen una distribució similar. En tots tres, es veu com les majors concentracions obtingudes de contaminants es donen als primers minuts de l'esdeveniment de pluja, el que es coneix com a "first flush" que s'ha explicat amb anterioritat al punt 5.3 *Contaminació d'aigües pluvials*. Això és degut a que en els primers minuts de l'esdeveniment el volum d'aigua és encara petit i, a conseqüència de la gran concentració de contaminants que s'ha anat acumulant tant als carrers com a la xarxa de drenatge urbà durant el període sec, ara són arrossegats per aquest petit volum d'aigua, donant lloc a altes concentracions.

Si analitzem amb detall la comparativa dels dos casos de pluja, es veu que en ambdós *Outfalls* les concentracions màximes de contaminants són superiors en el Cas 1 que no pas en el Cas 2. Això és significatiu i indica que el volum d'escorrentia en els primers instants de l'esdeveniment és menor en la pluja del 2020 que no pas en la pluja del 2050.

Per altra banda, les concentracions màximes de l'*Outfall* situat al centre de la xarxa de la ciutat, són superiors i es produeixen en un interval de temps anterior a aquelles produïdes al Sobreeixidor_03, pel que fa a SS i DQO. Això és degut a que els col·lectors situats al centre de la ciutat són els primers en recaptar l'aigua de la pluja, que posteriorment circularà fins a cotes més baixes. Sumat al fet que els col·lectors del centre de la ciutat tenen unes dimensions més reduïdes, ja que reben menys quantitat d'aigua, fa que les concentracions siguin majors que als grans col·lectors que transporten el total de l'aigua de la ciutat fins a l'estació EDAR.

Per tenir una visió més acurada i realitzar una millor interpretació de resultats, cal considerar els cabals d'aigua obtinguts en els dos *Outfalls* tal i com es mostren en la figura següent:

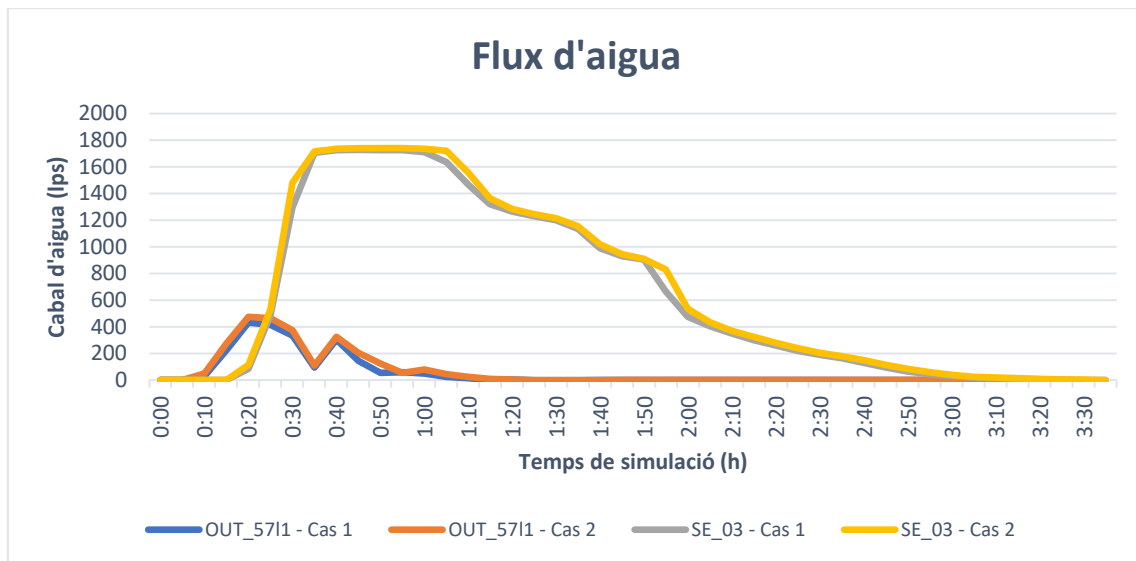


Figura 47. Cabal d'aigua als Outfalls pels dos casos d'estudi.

En aquesta figura es poden veure diferències considerables pel que fa al cabal abocat al Riu Congost per part dels dos *Outfalls*, en les respectives simulacions.

Cal destacar que les concentracions de contaminants, en el cas del Sobreeixidor_03, tornen a ser superiors i augmenten de forma considerable a partir de les 2 hores des de l'inici de la pluja. Aquest fet concorda amb el que es pot extreure del gràfic del flux d'aigua, en el qual es veu clarament que el cabal d'aigua disminueix i, per tant, les concentracions tornen a augmentar, ja que es tracta d'una xarxa unitària i l'aportació de contaminants en temps sec no cessa. El mateix passa en el OUT_57I1, però en menor proporció, a partir del minut 60 després de l'inici de les pluges.

Si es relacionen les concentracions amb els cabals circulants, s'obté el cabal màssic de cada un dels contaminants i resulta interessant a l'hora d'interpretar els resultats. A continuació es mostren els diferents gràfics referents als cabals màssics dels tres contaminants estudiats:

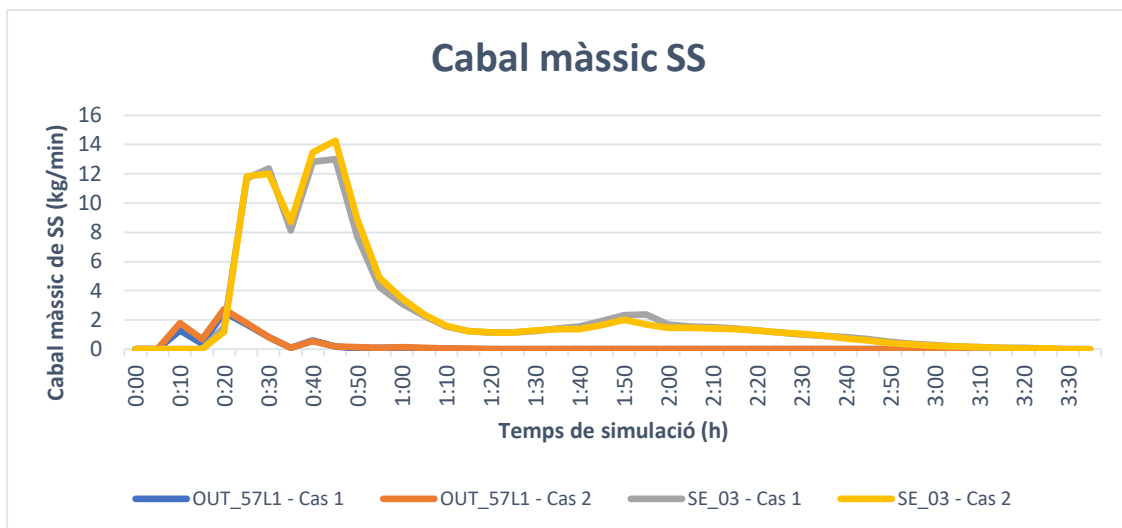


Figura 48. Cabal màssic de SS dels Outfalls en els dos casos d'estudi.

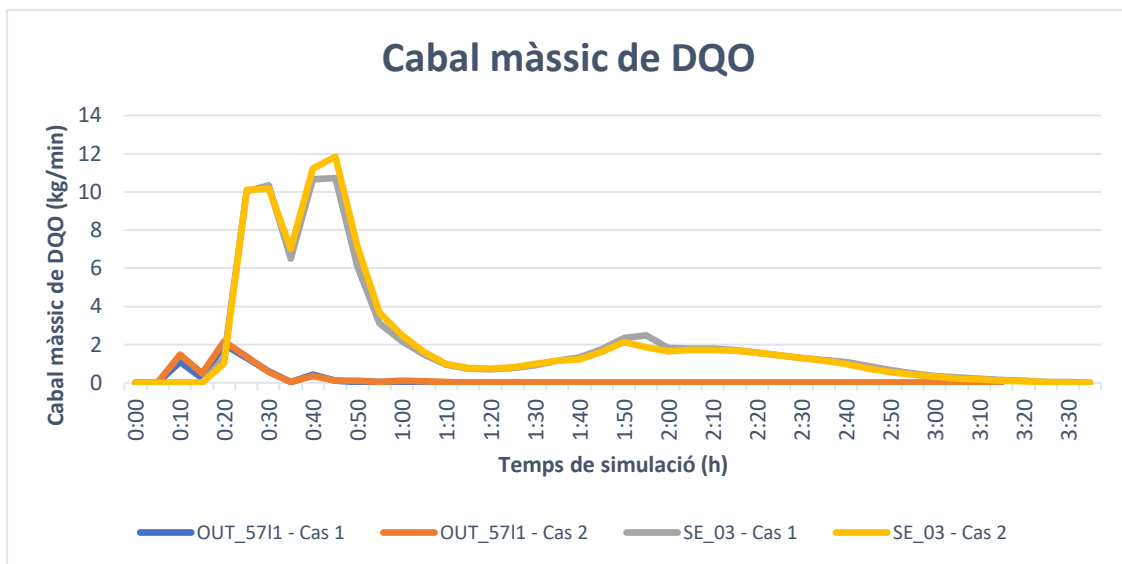


Figura 49. Cabal màssic de DQO dels Outfalls en els dos casos d'estudi.

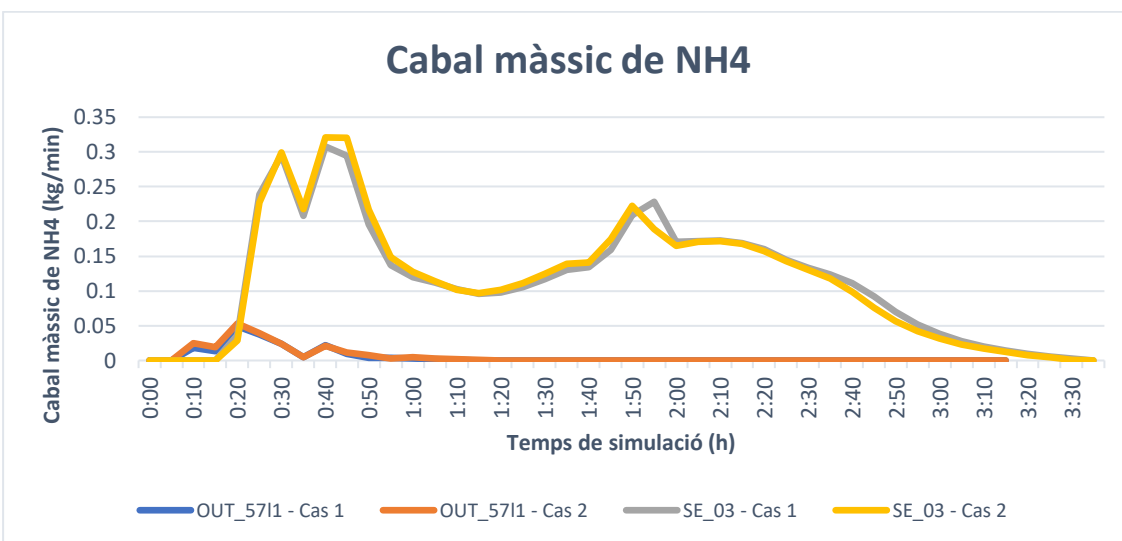


Figura 50. Cabal màssic de NH4 als Outfalls en els dos casos d'estudi.

D'aquesta manera es fa evident, doncs, que les quantitats de contaminant abocades al Riu Congost provinents de la xarxa de sanejament de la ciutat de Granollers són superiors en el Cas 2 i, per tant, en un esdeveniment de pluja més intens.

Així doncs es pot calcular, de forma aproximada, el total de contaminants abocats en cada *Outfall*, i es poden apreciar de forma global els resultats obtinguts.

En la *Taula 8* es mostren detalladament els valors totals:

		SS	DQO	NH4
CAS 1 (2020)	OUT_57I1	39,41 Kg	30,10 Kg	0,95 Kg
	SE_03	532,63 kg	462,12	25,06 Kg
CAS 2 (2050)	OUT_57I1	45,45 Kg	34,53 Kg	1,10 Kg
	SE_03	541,94 Kg	472,39 Kg	25,10 Kg
DIFERÈNCIA (Cas 2 – Cas1)	OUT_57I1	6,03 Kg (15,31%)	4,42 Kg (14,71%)	1,10 kg (15,60%)
	SE_03	9,31 Kg (+1,72%)	10,27 Kg (+2,18%)	0,03 Kg (+0,14%)

Taula 9. Resultats quantitius d'abocaments de contaminants i comparatiu dels dos casos de simulació.

Dels valors de la *taula 9* es pot extreure que en els dos *Outfalls* l'abocament de contaminants es superior, però proporcionalment és més considerable en el OUT_57I1, és a dir, en el *Outfall* situat prop del nucli antic de la ciutat.

7. Proposta de millora

Fins aquest apartat, el treball ha consistit en analitzar els possibles efectes que podria experimentar una xarxa de drenatge urbà en condicions de canvi climàtic. Un cop analitzades i estudiades les diferències obtingudes tant a nivell quantitatiu com qualitatiu, es volen trobar alternatives i/o propostes de millora, que donin resposta a les problemàtiques d'inundació i càrrega de col·lectors que pateix la ciutat que a més es poden fer més evidents en un futur tal com s'ha vist en l'estudi comparatiu dels casos 1 i 2.

A nivell d'inundació, i contestant a la segona pregunta (*pàgina 44*), s'ha vist clarament com pràcticament el conjunt de la xarxa no està suficientment capacitat per suportar el flux d'aigua d'una pluja d'alta intensitat. D'altra banda, en diferents línies de col·lectors les deficiències es fan encara més evidents. Es detecta que aquestes línies desemboquen directament a les línies de col·lectors principals que segueixen el curs principal del Riu Congost, a les lleres del riu, concretament per sota el Passeig Fluvial i el Passeig de la conca del Besòs.

En el mapa creat en SWMM v5.1, la línia de conductes rep el nom de GR1 en el cas dels conductes situats al Passeig Fluvial, i GR2 en el cas del Passeig de la Conca del Besòs. S'ha de tenir en compte que la Línia GR1, rep tots els cabals del Nucli Antic de la ciutat, de la Zona Nord, i la part del municipi de les Franqueses del Vallés. A més a més la línia GR2, deriva en diferents trams el seu cabal fins la GR1. D'aquesta manera, la línia GR1 està sobrecarregada i es detecta que gran part dels problemes de les línies secundàries, que pateixen fortes inundacions en les seves parts baixes, són deguts a que la línia principal està sobrecarregada. D'altra banda la GR1, durant tot el seu tram, està dimensionada amb un diàmetre lineal de 1m, per la qual cosa és més petita que moltes línies secundàries.

Per aquests motius, es proposa realitzar un estudi de rehabilitació convencional, és a dir, redimensionar la xarxa GR1 en el menor tram possible, però de tal manera que s'obtingui una reducció dels problemes d'inundació de la ciutat, donant solució a la tercera pregunta (*pàgina 44*).

7.1. Redimensionament de la GR1

La línia GR1, que és la línia principal de col·lectors, transita just per sota del passeig fluvial fins a Avinguda de l'estació del Nord, ja que en aquell tram creua a la banda dreta del Riu Congost, circulant subterràniament el Passeig de la Ribera. Està compost per un total 178 col·lectors que

creuen de nord a sud la ciutat de Granollers. Recull les aigües de les diferents branques secundàries conduint-les fins a l'estació EDAR. Cal destacar que aquesta línia no disposa d'un gran dimensionament, ja que en el tram del Passeig Fluvial (del GR1_2 situat a la EDAR, fins al GR1_66 situat a la Plaça de la Constitució), té un diàmetre de 1m. Per altra banda, el tram del GR1_67 fins el GR1_178 corresponen a diàmetres menors d'entre 0,8-0,4m. S'ha de tenir en compte que existeixen diferents conductes secundaris

A continuació, es mostra el perfil longitudinal de la xarxa actual, en l'episodi de pluja del Cas 2, en tot el tram del Passeig Fluvial, el que equival a 4,75 km lineals:

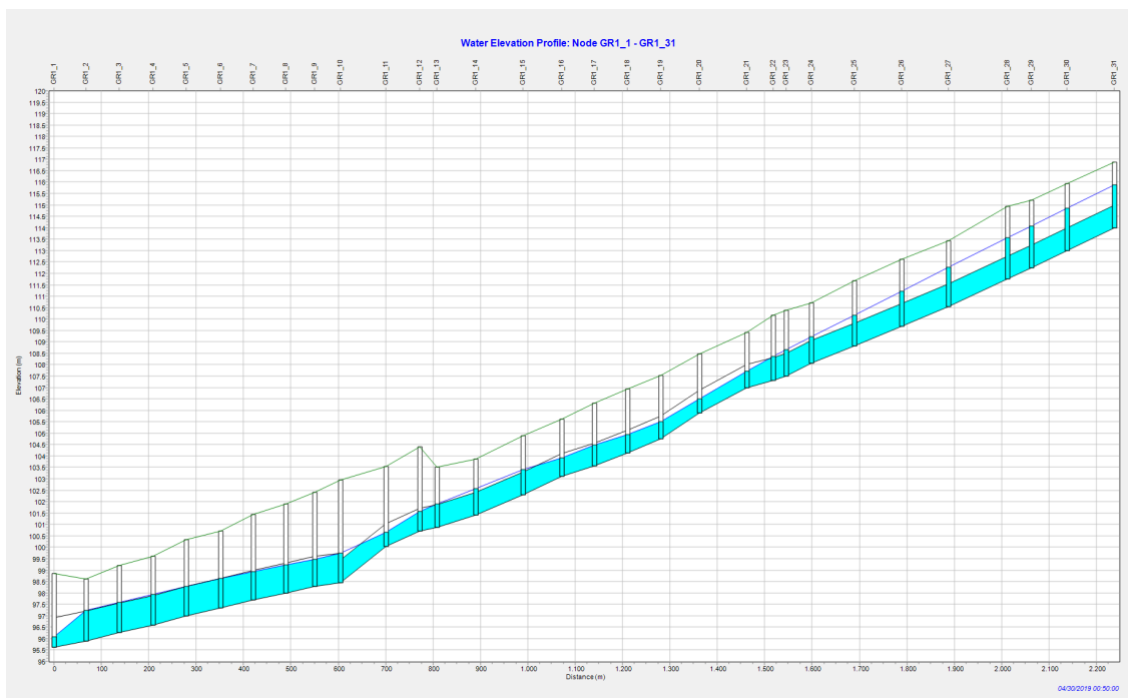


Figura 51. Perfil longitudinal de la línia GR1, entre els col·lectors GR_1 i GR_31, en l'instant de pluja 0:50h.

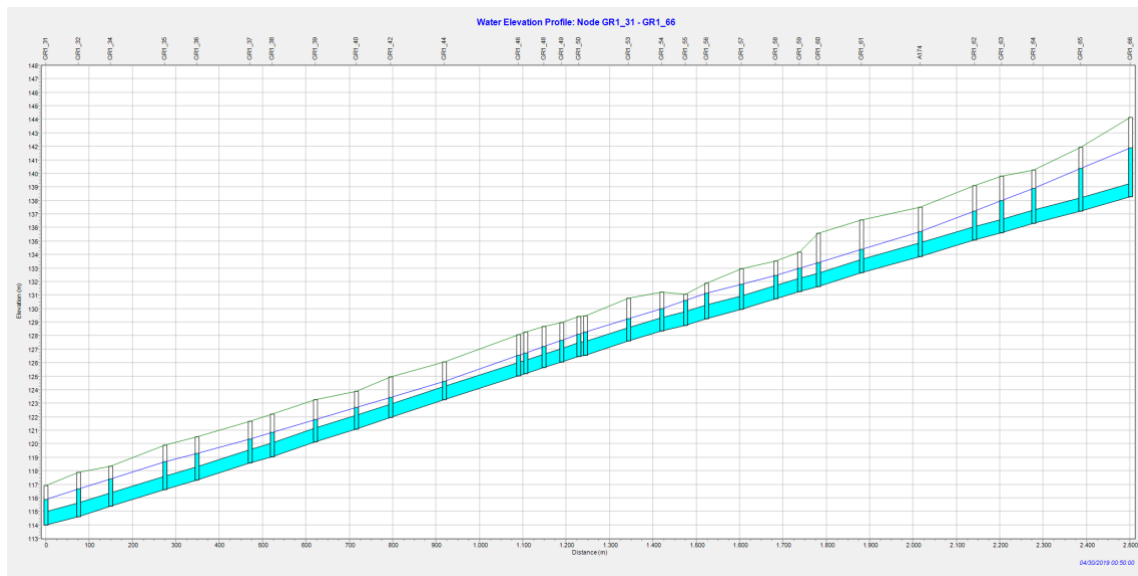


Figura 52. Perfil longitudinal de la línia GR1, entre els col·lectors GR_31 i GR_66, en l'instant de pluja 0:50h.

Tot i que els nodes de la xarxa no siguin dels que més inundació experimenten, sí que pateixen greus problemes d'inundació els nodes de les línies secundàries més propers a la desembocadura a la línia GR1. Per aquest motiu, es planteja l'alternativa d'actuar sobre aquesta xarxa, podent reduir de forma significativa els problemes d'inundació del conjunt de la ciutat. Sobretot, es pretén millorar la banda esquerra del Riu Congost, on es situa el nucli antic i es concentren la gran part dels habitatges i la zona comercial de la ciutat.

D'altra banda és important conèixer que els col·lectors de la GR1, en el seu tram del Passeig Fluvial, es troben sota terreny àrid, ja que es un passeig de vianants sense ús de vehicles, amb la qual cosa en pot facilitar les obres de rehabilitació, alhora que no impedeix el trànsit de vehicles, suposant menys molèstia per als ciutadans.

A continuació es mostren els perfils longitudinals un cop aplicades les modificacions, augmentant el diàmetre fins a 2 metres a la línia GR1, des del col·lector GR1_2 fins el GR1_66:

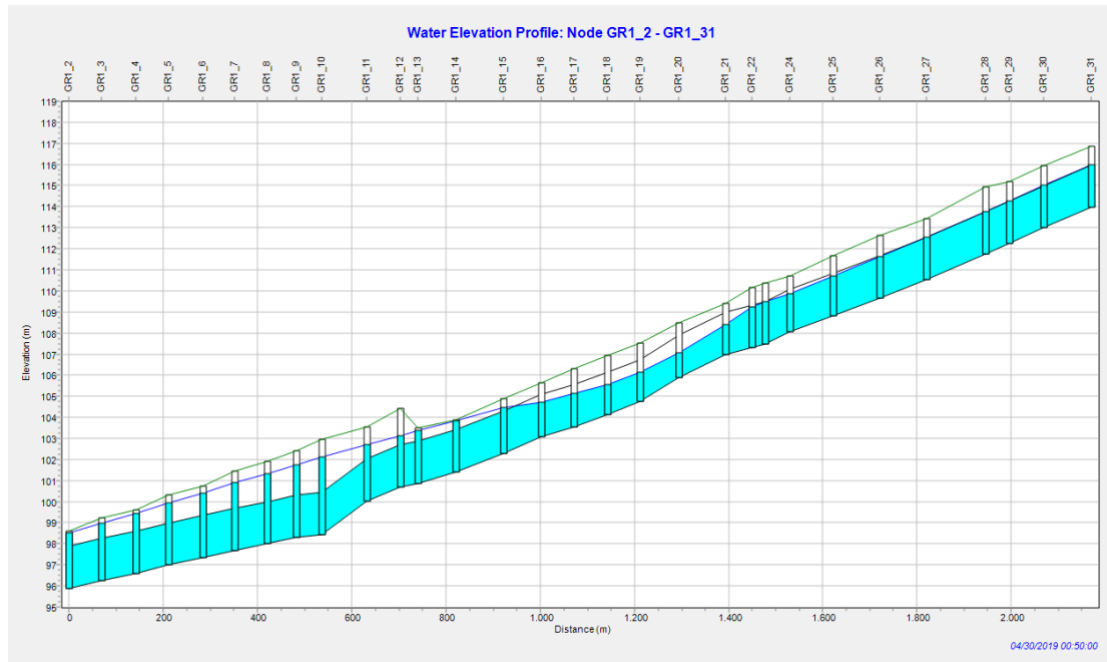


Figura 53. Perfil longitudinal de la línia GR1 redimensionada, entre els col·lectors GR_2 i GR_31, en l'instant de pluja 0:50h.

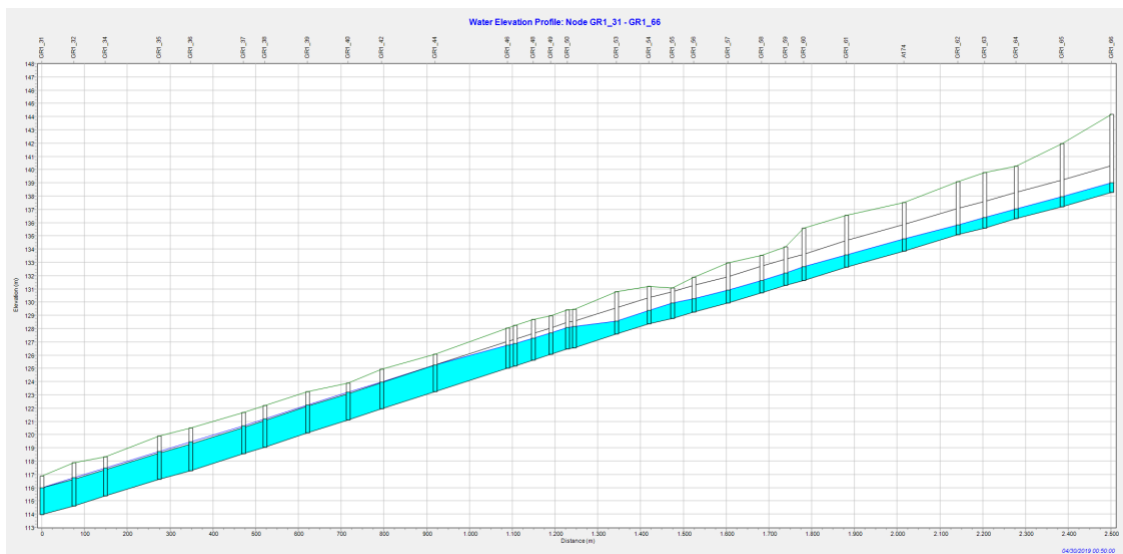


Figura 54. Perfil longitudinal de la línia GR1 redimensionada, entre els col·lectors GR_31 i GR_66, en l'instant de pluja 0:50h.

Es pot apreciar com, amb aquest augment de diàmetre, la xarxa està capacitada per transportar més volum d'aigua i per tant les línies secundàries no col·lapsen de la mateixa manera, de manera que el volum d'inundació que es produeix a la ciutat es redueix.

En la taula següent, Taula 9, es comparen els resultats globals de quantitats d'aigües obtingudes en aquesta tercera simulació, i el comparen amb la segona simulació, la del Cas 2. Es comprova el plantejat anteriorment, generant unes millores considerables en termes d'inundació a la ciutat.

	Evacuació (10 ⁶ litres)	Inundació (10 ⁶ litres)
Cas 2 (2050)	134,17	23,49
Redimensionament	145,25 (+8,25%)	12,47 (-53,08%)

Taula 10. Comparatiu resultats quantitatius d'aigua realitzant el redimensionament de la GR1.

Finalment podem concretar que amb la modificació de 4,75 km lineals de xarxa d'un total de 72,7 km els beneficis són substancials, ja que representen una disminució del 53,08% pel que fa a inundacions. Les mancances de la xarxa són evidents en diferents punts, però seria insuficient actuar puntualment sense aprofundir en un estudi que suposés el redimensionament de la línia GR1, ja que és la línia que assumeix tota la càrrega d'aigua i la condueix fins l'estació EDAR.

Un cop realitzada aquesta rehabilitació de la xarxa principal, es poden buscar punts conflictius i estudiar quines mesures pertinents es poden prendre, sense deixar de banda les mesures de mitigació que aporten les SUDS, que possibiliten un model de recollida d'aigües més sostenible pel medi ambient.

8. Conclusions

Les ciutats del litoral català han patit grans transformacions al llarg dels darrers anys com a conseqüència del creixement demogràfic i urbanístic. Aquesta modificació del territori ha alterat de forma considerable les conques hidrològiques naturals, impermeabilitzant grans superfícies de territori i alterant d'aquesta manera el cicle hidrològic de l'aigua. Les xarxes de clavegueres són les encarregades d'evacuar les aigües pluvials de la superfície de les ciutats, però en molts casos, aquestes infraestructures no estan dimensionades per assumir tota l'aigua pluvial d'un episodi de pluja d'alta intensitat, generant una situació d'inundació i causant greus danys materials i humans. D'altra banda, cada vegada sembla més evident que el Planeta Terra es troba en un procés de canvi climàtic i, tot i que és incert què depararà el futur, les prediccions mostren que els episodis de pluja poden ser menys recurrents, però de major intensitat, per la qual cosa es poden agreujar els problemes que ja pateixen actualment les xarxes de drenatge urbà.

Aquest treball té com a objectiu principal analitzar l'impacte que poden provocar les alteracions produïdes pel canvi climàtic en la xarxa de drenatge urbà d'una conca urbana del litoral català, concretament la ciutat de Granollers. Per dur a terme un estudi comparatiu s'han realitzat dues simulacions del procés pluja-escorrentia mitjançant el software de càlcul SWMM v5.1. que proporciona dades referents a la qualitat i quantitat d'aigua a la xarxa de clavegueres.

La primera simulació, el cas 1, ha estat realitzada amb una pluja de disseny actual per l'any 2020, de període de retorn de 10 anys. En la segona simulació, el cas 2, s'ha utilitzat un possible episodi de pluja, amb el mateix període de retorn, però en un hipotètic escenari en condicions de canvi climàtic l'any 2050. Aquestes dues simulacions permeten realitzar un estudi comparatiu d'aquests dos episodis, amb la finalitat de determinar les problemàtiques derivades de les variacions en les intensitats de pluja, provocades per les noves condicions climàtiques.

De l'anàlisi comparatiu dels casos 1 i 2, és a dir, les pluges de 2020 i de 2050 respectivament, tenint en compte que la precipitació augmenta un 12,02% en la pluja del episodi 2050 respecte a la del 2020, es poden extreure les següents conclusions en termes quantitatius de l'aigua:

- L'evaporació no augmenta proporcionalment a l'augment del volum de precipitació, i només pateix un increment del 0,57%.
- La infiltració pateix un augment lleugerament inferior al del volum de precipitació, experimentant un increment del 9,39%.

- L'escorrentia experimenta un augment del 15,28% en la pluja del 2050, superior a l'augment del volum de precipitació.

Per tant podem afirmar que un increment de la intensitat de pluja, provoca que una major proporció d'aigua es converteix en escorrentia. Aquest fet es deu a que la ciutat no està capacitada per infiltrar proporcionalment el volum d'aigua, i que l'augment d'intensitat no afecta substancialment a l'evaporació.

La xarxa de clavegueres en ambdós casos mostra deficiències pel que fa al transport de les aigües pluvials. En els dos casos la xarxa entra en càrrega en més d'un 40% però, és en el cas 2 (2050), on es veuen més agreujades. A continuació es mostren les dades principals:

- En el cas 1 (2020) entren en càrrega 537 dels 1185 col·lectors estudiats, el que suposa 31,44 km lineals de xarxa. En el cas 2 (2050), amb l'augment de la intensitat de pluja, s'arriben als 33,01 km lineals, significant això que un 45,37% de la xarxa entra en càrrega en algun moment de la simulació. També es mantenen en aquest estat durant un període més perllongat, concretament es produeix un augment del 10,28% pel que fa a les hores en estat de càrrega.
- El volum d'aigua que inunda la ciutat es un 27,02% més elevat que en el cas 1 (2020). S'arriba així als $23,5 \times 10^6$ litres, que surten a través dels 171 pous inundats, 17 pous més que en el cas 1 (2020).
- El volum d'aigua abocada al medi natural augmenten un 12,51% en el segon episodi de pluja (2050).

En termes de qualitat de l'aigua, segons els tres indicadors estudiats (SS, DBO, NH_4), s'obtenen les següents conclusions:

- Les concentracions de contaminants són superiors en cas 1, episodi del 2020, de menys intensitat de pluja. Això es deu a que hi un menor volum d'escorrentia i, per tant, les concentracions de contaminants són superiors.
- Mitjançant els estudis de cabals màssics, es comprova que l'abocament de contaminants al medi és superior en el segon cas de simulació (2050).

- Pel que fa als contaminants expulsats per inundació, es produeixen augments del 16,92% dels SS, del 10,77% en DQO i del 22,28% en NH_4 , degut a la major inundabilitat del cas 2 (2050).

En definitiva, es demostra que un augment de la intensitat de pluja, provocat per les possibles noves condicions climàtiques, pot causar problemes de sobrecàrrega i desbordament de l'actual xarxa de clavegueres de la ciutat de Granollers, generant abocaments amb alta càrrega contaminant al Riu Congost, podent generar greus problemes mediambientals, ja que aquest és un riu poc cabalós.

Finalment s'ha presentat una proposta de millora de la xarxa en la qual, després d'un estudi analític, s'han vist les deficiències de la línia GR1. Després de diverses proves s'ha arribat a la conclusió que les possibles reformes integrals de la xarxa han de considerar un replantejament i/o un redimensionament de la xarxa d'aigües avall de la ciutat.

9. Bibliografia

Gómez, M. (1992). Capítol: *Análisis hidráulico de las redes de drenaje urbano (Inundaciones y Redes de Drenaje Urbano)* Edició: J.Dolz, M. Gómez, J.P. Martín Vide. Colegio de Ing. de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.

Arandes, R. (1992). Capítol: *Planeamiento urbanístico y drenaje urbano (Inundaciones y Redes de Drenaje Urbano)* Edició: J.Dolz, M. Gómez, J.P. Martín Vide. Colegio de Ing. de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.

Gutiérrez, C. (1992). Capítol: *La gestión de las infraestructuras de drenaje urbano (Inundaciones y Redes de Drenaje Urbano)* Edició: J.Dolz, M. Gómez, J.P. Martín Vide. Colegio de Ing. de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.

Martín Vide, J. (1992). Capítol: *Características extremas de la precipitación en el área mediterránea (Inundaciones y Redes de Drenaje Urbano)* Edició: J.Dolz, M. Gómez, J.P. Martín Vide. Colegio de Ing. de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.

Monte, V., Marco, J. (1992). Capítol: *Formación de la escorrentía urbana. Procesos físicos y métodos de cálculo (Inundaciones y Redes de Drenaje Urbano)* Edició: J.Dolz, M. Gómez, J.P. Martín Vide. Colegio de Ing. de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.

IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.

IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.

Casas, M. C., & Redaño, Á. (1995). *Análisis espacial y temporal de las lluvias extremas en Catalunya. Modelización y clasificación objetiva*. Programa de doctorat a l'Universitat de Barcelona, Departament d'Astronomia i Meteorologia.

Calbó, J., Gonçalves, M., Barrera Escoda, A., García-Serrano, J., Doblas-Reyes, F., Guemas, V., Cunillera, J., Altava, V. (2016). *Proyecciones climáticas i escenaris de futur. Tercer informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. Edició: Institut d'Estudis Catalans (IEC) i Generalitat de Catalunya.

Mambretti, S., Brebbia, C.A., (2012). *Urban Water. First International Conference on the design, construction, maintenance, monitoring and control of urban water Systems*. Edició: WIT Transactions on the Built Enviroment.

Leandro, J., Djordjević, S., Chen, A., Savic, D., (2009). *Comparison of 1D/1D and 1D/2D Coupled (Sewer/Surface) Hydraulic Models for Urban Flood Simulation*. Edició: Journal of Hydraulic Engineering 135 (6): 495-504.

Bruch, R., Pellicé, A., (1988). *Estudi de la Climatologia de Granollers*.

Ajuntament de Granollers (2006) *Pla de Paisatge de Granollers/2*.

Pujadas, M. (2016). Casos pràctics. El servei municipal de clavegueram de Granollers. Edició: Drenatges Urbans del Besòs, S.L.

Grum, M., Jørgensen, A.T., Johansen, R.M., and Linde, J.J. (2006). *The Effect of Climate Change on Urban Drainage: An Evaluation Based on Regional Climate Model Simulations, 10th International Conference on Urban Drainage*. Copenhagen, Denmark. Edició: Water Science & Technology 54 (6-7): 9-15.

Martínez, E., (2016) *Inundaciones Urbanas: Criterios de peligrosidad y evaluación del riesgo para peatones y vehículos*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

Daywater Project (2003). *Report 5.1. Review of the Use of Stormwater BMPs in Europe*.

Arrizabalaga, A. Sadurní, J., Pardo, J., (1984). *Els orígens de Granollers i del Vallés Oriental*.

Mohammadiun, S., Yazadi, J., Hager, J., (2019). *Effects of bottleneck blockage on the resilience of an urban stormwater drainage System*. Edició: Hydrological Sciences Journal, Vol. 65, 2020.

Gironás, J., Roesner, L.A., Rossman, L.A. and Davis, J., (2009). *Storm Water Management Model. Applications manual*. Edició: United States Environmental Protection Agency.

Perales, S., Doménech, I., (2008). *Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible: Una Alternativa a La Gestión del Agua de Lluvia*. Universitat Politècnica de València.

Rossman, L.A., (2009). *Storm Water Management Model. User's manual. Version 5*. Edició: United States Environmental Protection Agency.

Dolz, J., Gómez, M. (1994). *Problemática del drenaje de aguas pluviales en zonas urbanas y el estudio hidráulico de las redes de colectores*. Edició: Ingeniería del Agua. 1 (1): 55-66.

Arranz, M. (2008). El riesgo de inundaciones y la vulnerabilidad en áreas urbanas. Análisis de casos en España. Edició: Estudios Geográficos, Vol. 69, No 256.